

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»
УДК 621.314

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

« ____ » _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
спеціалізації Системи електропостачання**

**на тему: «Оцінювання якості електроенергії в децентралізованих системах
електропостачання»**

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ОЕ-71мп

Ращенко Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Волошко А. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Консультант нормоконтроль ас. Прокопенко І.Д.

(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент к.т.н., доцент Данілін О. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Системи електропостачання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

**на магістерську дисертацію студенту
Ращенко Олександр Миколайовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації « Оцінювання якості електроенергії в децентралізованих системах електропостачання »

науковий керівник дисертації д.т.н., проф. Волошко А.В.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2018 р. № 4089-с

2. Строк подання студентом дисертації 10 грудня 2018 року

3. Об'єкт дослідження: процес оцінювання гармонічного складу електричної напруги в системі електропостачання.

4. Предмет дослідження: способи та засоби оцінювання якості електричної енергії.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- Проаналізувати проблеми забезпечення якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання;

- Проаналізувати методи та засоби проведення гармонічного аналізу інформаційних сигналів;

- Проаналізувати сучасні способи та засоби виявлення гармонічних груп та підгруп в електричній мережі та розробити (при необхідності) спосіб їх визначення.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження, алгоритми розрахунків та таблиці з отриманими результатами
7. Орієнтовний перелік публікацій -
8. Консультанти розділів дисертації
 Нормоконтроль ас. Прокопенко І.Д.
9. Дата видачі завдання 18 квітня 2018 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Визначення мети, об'єкту, предмету дослідження.	18.04.2018-23.04.2018	
2.	Визначення попередньої структури дисертації	23.04.2018-27.04.2018	
3.	Огляд літератури та робота над першим розділом	27.04.2018-27.05.2018	
4.	Аналіз водневих технологій та робота над другим розділом	27.05.2018-27.06.2018	
5.	Проведення розрахунків та робота над третім розділом	27.06.2018-01.10.2018	
6.	Розробка стартап-проекту	01.10.2018-15.11.2018	
7.	Оформлення дисертації	15.11.2018-25.11.2018	
8.	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	25.11.2018-01.12.2018	
9.	Передзахист МД	10.12.2018-14.12.2018	
10.	Захист дисертації	17.12.2018-20.12.2018	

Студент

(підпис)

Раценко О. М.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Волошко А. В.
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на тему «Оцінювання якості електроенергії в децентралізованих системах електропостачання». Містить 81 сторінку, 21 рисунок, 20 таблиць та 39 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Актуальність теми пов'язана із збільшенням альтернативних джерел розосередженої генерації що в свою чергу призводить до погіршення якості електричної енергії за рахунок наявності частотних перетворювачів електричної енергії, що зумовило розроблення інформаційної моделі та методу підвищення точності та швидкодії визначення параметрів якості електричної енергії.

Метою роботи є на основі розробленої інформаційної моделі та способу ідентифікації спотворень якості електричної енергії підвищити точність та швидкодії визначення параметрів якості електричної енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань:

- 1) проаналізувати проблеми забезпечення якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання;
- 2) проаналізувати методи та засоби проведення гармонічного аналізу інформаційних сигналів;
- 3) проаналізувати сучасні способи та засоби виявлення гармонічних груп та підгруп в електричній мережі та розробити (при необхідності) спосіб їх визначення.

Мета і задачі дослідження. На основі розробленої інформаційної моделі та способу ідентифікації спотворень якості електричної енергії підвищити точність та швидкодії визначення параметрів якості електричної енергії.

Об'єкт дослідження – процес оцінювання гармонічного складу електричної напруги в системі електропостачання.

Предметом дослідження є способи та засоби оцінювання якості електричної енергії.

Наукові результати дисертаційної роботи були отримані з використанням моделі електросистеми, що була створена за допомогою Matlab Simulink.

Методи дослідження. Наукові результати дисертаційної роботи були отримані з використанням моделі електросистеми, що була створена за допомогою Matlab Simulink.

Новизна і практична значущість. На основі розробленої інформаційної моделі та способу ідентифікації спотворень якості електричної енергії підвищено швидкість та точність виявлення гармонічних та інтергармонічних груп та підгруп в електричній мережі.

Апробація результатів дисертації. Виконано 1 (одну) доповідь на науково-технічній конференції, опублікована одна робота (тези доповідей).

Ключові слова: якість електричної енергії, ортогональні вейвлет-перетворення, децентралізовані системи електропостачання, узагальнений коефіцієнт якості електроенергії, доза Флікера, інтергармонічні коливання, субгармонічні коливання, перетворення Фур'є.

ABSTRACT

The master's dissertation was performed on the theme "Estimation of the quality of electric power in decentralized power supply systems". Contains 81 pages, 21 figures, 20 tables and 39 bibliographic titles in the list of links.

The urgency of the topic is related to the increase of alternative sources of dispersed generation, which in turn leads to a deterioration in the quality of electric energy due to the presence of frequency converters of electrical energy, which led to the development of an information model and method for increasing the accuracy and speed of determination of parameters of the quality of electric energy.

The aim of the work is to develop an information model and a method for detecting distortions of the quality of electric energy in order to improve the accuracy and speed of determining the parameters of the quality of electric energy.

To achieve this goal, it is necessary to solve a number of problems:

- 1) analyze the problems of ensuring the quality of electricity in the systems of decentralization of electricity supply;
- 2) to analyze methods and means of harmonious analysis of information signals;
- 3) analysis of modern methods and means of detecting harmonic groups and subgroups in the electrical network and, if necessary, developing a method for their determination.

The purpose and tasks of the study. On the basis of the developed information model and method for identifying distortions of quality of electric energy, increase the accuracy and speed of determination of parameters of quality of electric energy.

The object of the study is the process of estimating the harmonic composition of the electric voltage in the electricity supply system.

The subject of the study is methods and means of assessing the quality of electrical energy.

The scientific results of the dissertation work were obtained using the model of the electric system, which was created using Matlab Simulink.

Novelty and practical significance. Based on the developed information model and method for identifying distortions of quality of electric energy, the speed and accuracy of detection of harmonic and interharmonic groups and subgroups in the electric network has been increased.

Approbation of the results of the dissertation. 1 (one) report has been fulfilled at the scientific and technical conference, one work (theses of reports) has been published.

Key words: electrical energy quality, orthogonal wavelet transformation, decentralized electrical supply systems, generalized electricity quality coefficient, Flicker dose, interharmonic oscillations, subharmonic oscillations, Fourier transform.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. РОЗОСЕРЕДЖЕНА ГЕНЕРАЦІЯ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	10
1.1 Джерела розосередженої генерації електричної енергії.....	10
1.2 Показники якості електричної енергії	12
1.3 Вплив впровадження джерел розосередженої генерації на роботу системи електропостачання.....	31
Висновки.....	33
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ГАРМОНІЧНИЙ СКЛАД ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ДОЗУ ФЛІКЕРА.....	35
2.1 Побудова моделі електричної мережі із наявністю джерела розосередженої генерації.....	35
2.2 Дослідження гармонічного складу електричної енергії, що генерується сонячним, дизель-генератором, вітровою та малою гідроелектростанцією.....	38
2.3 Дослідження взаємного впливу різних джерел енергії на гармонічний склад електричної енергії на дозу флікера.....	40
2.4 Дослідження впливу на дозу флікера інтергармонічних та субгармонічних коливань.....	42
Висновки.....	43
3. ВИЗНАЧЕННЯ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТУПЕНЮ СПОТВОРЕННЯ ФОРМИ СИГНАЛУ	45
Висновки.....	62
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	65
4.1 Опис ідеї проекту.....	65
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	66
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	67
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	69
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	70
Висновки.....	73
ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

ВСТУП

На зміну централізованому електропостачанню від крупних електростанцій приходить комбіноване електропостачання, коли безпосередньо в розподільних електричних мережах розбудовуються відновлювані джерела енергії [1,2]. Це вітрові, сонячні та малі гідро електростанції (ВЕС, СЕС, малі ГЕС). Розподілене генерування в електричній мережі впливає на її режими, в результаті чого виникають нові можливості і нові задачі щодо оптимального використання розподілених джерел енергії (РДЕ). РДЕ постачають електроенергію найближчим споживачам, а в разі появи надлишків енергії можуть її передавати в мережі централізованого електропостачання. РДЕ умовно можна поділити на керовані (дизельні електричні станції, когенераційні і т.п.), умовно керовані (малі ГЕС за відсутності достатньої для безперервної роботи кількості води) і не керовані, наприклад, ВЕС і СЕС [3]. Кількість РДЕ з кожним роком зростає, що призводить до виникнення ситуації, коли в електричній мережі можуть експлуатуватись декілька різнотипних РДЕ, серед яких некеровані і умовно керовані [4.5].

Розподілене генерування також може бути джерелом вищих гармонік в мережі. Гармоніки можуть бути або з самого генератора (синхронного генератора) або від обладнання силової електроніки, такого як інвертори Широке впровадження в останній час, так званих, розосереджених джерел електричної енергії перетворює централізовану пасивну систему електропостачання в децентралізовану.

В свою чергу, встановлення такої генерації, завдяки появі великої кількості додаткових взаємозв'язків, суттєво впливає на інформаційні потоки в системах електропостачання і, в кінцевому випадку, на якість електричної енергії. Тому аналіз такого впливу є актуальною науково-практичною задачею.

Як відомо, впровадження джерел розосередженої генерації характеризується різким збільшенням силових електронних систем, що приводить до погіршення якості електричної енергії. Причинами такого погіршення, наряду із впровадженням джерел розосередженої генерації (генерація в електричну мережу гармонік, інтер- та субгармонік), є також наявність у споживачів потужних нелінійних, несиметричних навантажень із різко-змінним режимом роботи. До таких навантажень відносяться

дугові електро-сталеплавильні печі, потужні прокатні стани, електрозварні пристрої та інше.

Дані навантаження негативно впливають на якість електричної енергії систем електропостачання, до яких вони підключені. Це обумовлено тим, що характер споживання ними активних і реактивних потужностей відповідає їх різко-змінним, повторно-короткочасним режимам роботи, що призводить до коливань напруги [] та флікеру. Коливання напруги, у свою чергу, призводить до модуляції у часі амплітуд і фаз складових струму як основної, так і вищих гармонік, які генеруються у електричну мережу.

У зв'язку з цим у роботі розглядається вплив на якість електричної енергії (доза флікера) гармонік, інтергармонік та субгармонік, які генерують у електричну мережу розосереджені джерела енергії.

У зв'язку з цим було досліджено вплив різних джерел енергії на гармонічний склад електричної енергії та дозу флікера.

Об'єкт дослідження: процес оцінювання гармонічного складу електричної напруги в системі електропостачання.

Предметом дослідження: способи та засоби оцінювання якості електричної енергії.

Методи дослідження. Метод Фур'є, вейвлет-аналізу та методи ортогональних перетворень, використання обчислюваної техніки Matlab Simulink.

Новизна і практична значущість

Полягає в розробленні інформаційної моделі та способу ідентифікації спотворень якості електричної енергії. На основі розробленої інформаційної моделі та способу ідентифікації спотворень якості електричної енергії підвищено швидкість та точність виявлення гармонічних та інтергармонічних груп та підгруп в електричній мережі.

Результати досліджень були оприлюднені на науково-технічній конференції та включені в збірники праць.

В дисертації побудована модель електричної мережі із наявністю джерела розосередженої генерації, використано модель електросистеми, що була створена за допомогою Matlab Simulink

1 РОЗОСЕРЕДЖЕНА ГЕНЕРАЦІЯ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1 Джерела розосередженої генерації електричної енергії

До джерел розосередженої генерації відносять установки малої потужності (до 10 МВт), що безпосередньо розташовані поблизу споживача, та можуть бути під'єднані до енергосистеми. До джерел розосередженої генерації відносяться: фотоелектричні елементи, вітрові установки, малі ГЕС, дизель генератори.

Сонячні фотоелектричні станції (СЕС) – один з різновидів електростанцій, які генерують електричний струм шляхом безпосереднього перетворення енергії сонячного випромінювання в електроенергію. Сонячні електростанції використовують фотоелектричний ефект та базуються на фотоелектричних модулях наземного застосування. Конструкція фотоелектричних панелей забезпечує високу надійність і захищеність сонячних електростанцій в цілому. До складу мережевої фотоелектричної системи, крім сонячних модулів, також входять: мережеві інвертори, що перетворюють постійний струм (DC), що генерується сонячними панелями, в змінний (AC); система моніторингу, що дозволяє відстежувати параметри роботи сонячної електростанції; лічильники, призначені для моніторингу продуктивності системи та продажу електроенергії за «зеленим» тарифом; підтримуючі металоконструкції для розміщення сонячних батарей на земельній ділянці, даху будівлі; централізована лінія електропередач, до якої приєднана електростанція; власні споживачі електроенергії (промислові чи побутові електроприлади).

Довгострокова експлуатація мереж, до яких підключені сонячні фотоелектричні системи, показує значне зменшення ефективності у зв'язку з порушенням стійкості джерела та збоями в роботі інвертора. Силкові перетворювачі в даних системах разом з нелінійними навантаженнями є джерелом вищих гармонік. Для того, щоб визначити види завад, які виникають при роботі сонячних панелей розглядають інвертори. Найбільш поширене застосування мережевого інвертору

GWV, мережевий інвертор європейського виробництва DELTA, тому завади мають синусоїдальну форму сигналу.

Також в енергетиці України велику увагу приділяють вітроенергетичним установкам. Малі вітроенергетичні установки (ВЕУ) (потужністю до 100 кВт) знаходять широке застосування для автономного живлення споживачів. До основних компонентів системи, без яких робота ВЕУ неможлива, відносять наступні елементи:

- генератор – потрібний для заряду акумуляторних батарей. Від його потужності залежить як швидко заряджатимуться ваші акумулятори. Генератор потрібний для вироблення змінного струму. Сила струму і напруга генератора залежить від швидкості і стабільності вітру;

- контролер – керує багатьма процесами вітроустановки, такими, як поворот лопатей, заряд акумуляторів, захисні функції та ін. Він перетворює змінний струм, який виробляється генератором в постійний для заряду акумуляторних батарей;

- акумуляторні батареї – накопичують електроенергію для використання в безвітряні години. Також вони вирівнюють і стабілізують напругу, що виходить, з генератора. Завдяки ним ви отримуєте стабільну напругу без перебоїв навіть при поривчастому вітрі. Живлення вашого об'єкту йде від акумуляторних батарей;

- АВР – автоматичний перемикач джерела живлення. Робить автоматичне перемикання між декількома джерелами електроживлення за проміжок в 0,5 секунд при зникненні основного джерела. Дозволяє об'єднати вітроустановку, громадську електромережу, дизель-генератор і інші джерела живлення в єдину автоматизовану систему;

- інвертор – перетворює струм з постійного, який накопичується в акумуляторних батареях, в змінний, який споживає більшість електроприладів.

Дизель генераторна установка – це автономний пристрій, який виробляє електроенергію за допомогою спалювання дизельного палива. Як правило, ДГУ складається з двигуна внутрішнього згорання і електрогенератора, який виробляє змінний струм. Двигун і електрогенератор встановлені на загальній платформі і жорстко прикріплені до металевої рами. Допоміжне автоматичне обладнання

забезпечує їх спільну роботу і здійснює контроль над процесом. Такі електростанції економічні, надійні в експлуатації і безпечні. При стисканні в двигуні дизельного палива, відбувається його займання і перетворення в механічну енергію за допомогою кривошипно-шатунного механізму, що обертає ротор електрогенератора. Ротор створює електромагнітне поле, яке перетворює індукційний струм в змінний. Тому для визначення електромагнітних завад в дизель генераторних установках потрібно розглядати технічні характеристики самої ДГУ, комплектуючі та умови експлуатації: тип навантаження і режим роботи. Найчастіше виникають сигнали синусоїдальної, прямокутної та пилоподібної форм.

В Україні також використовуються малі ГЕС, як джерела електричної енергії. Переважно в них використовують два різних типи генераторів: асинхронні трифазні генератори змінного струму та синхронні трифазні генератори змінного струму. Тому найчастіше в таких генераторах виникають прямокутні сигнали електромагнітних завад.

1.2 Показники якості електричної енергії

Стандартом встановлюються наступні показники якості електроенергії (ПЯЕ):

- стале відхилення напруги δU_y ;
- розмах зміни напруги δU_t ;
- доза флікера P_t ;
- спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- n-ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності K_{0U} ;
- відхилення частоти Δf ;
- тривалість провалу напруги Δt_n ;
- імпульсна напруга $U_{\text{имп}}$;
- коефіцієнт тимчасового перенапруження $K_{\text{пер}U}$.

При визначенні значень деяких ПЯЕ стандартом вводяться наступні допоміжні параметри електричної енергії:

- частота повторень змін напруги $F_{\delta U_t}$;
- інтервал між змінами напруги $\Delta t_i, \Delta t_{i+1}$;
- глибина провалу напруги δU_p ;
- частість появи провалів напруги F_p ;
- тривалість імпульсу по рівню 0,5 його амплітуди $t_{\text{imp}0,5}$;
- тривалість тимчасового перенапруження $\Delta t_{\text{пер}U}$.

Частина ПЯЕ характеризує сталі режими роботи електроустаткування енергозабезпечуючої організації і споживачів електричної енергії (ЕЕ) і дає кількісну оцінку по ЯЕ особливостях технологічного процесу виробництва, передачі, розподілу і споживання ЕЕ. До цих ПЯЕ відносяться: стале відхилення напруги, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривій напруги, коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги, коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності, коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності, відхилення частоти, розмах зміни напруги.

Оцінка всіх ПЯЕ, що відносяться до напруги, здійснюється по його діючих значеннях.

Для характеристики вище перелічених показників стандартом встановлені чисельні нормально і гранично допустимі значення ПЯЕ або норми.

Інша частина ПЯЕ характеризує короточасні перешкоди, що виникають в електричній мережі в результаті комутаційних процесів, грозових атмосферних явищ, роботи засобів захисту і автоматики і в післяаварійних режимах. До них відносяться провали і імпульси напруги, короточасні перенапруження. Для цих ПЯЕ стандарт не встановлює допустимих чисельних значень. Для кількісної оцінки цих ПЯЕ повинні вимірюватися амплітуда, тривалість, частота їх появи і інші характеристики, встановлені, але не нормовані стандартом. Статистична обробка цих даних дозволяє розрахувати узагальнені показники, що характеризують конкретну електричну мережу з погляду вірогідності появи короточасних перешкод [6].

Для оцінки відповідності ПЯЕ вказаним нормам (за винятком тривалості провалу напруги, імпульсної напруги і коефіцієнта тимчасового перенапруження) стандартом встановлюється мінімальний розрахунковий період, рівний 24 ч.

У зв'язку з випадковим характером зміни електричних навантажень вимога дотримання норм ЯЕ протягом всього цього часу практично нереальність, тому в стандарті встановлюється вірогідність перевищення норм ЯЕ. Зміряні ПЯЕ не повинні виходити за нормально допустимі значення з вірогідністю 0,95 за встановлений стандартом розрахунковий період часу (це означає, що можна не зважати на окремі перевищення нормованих значень, якщо очікувана загальна їх тривалість складе менше 5% за встановлений період часу).

Іншими словами, ЯЕ по зміряному показнику відповідає вимогам стандарту, якщо сумарна тривалість часу виходу за нормально допустимі значення складає не більш 5% від встановленого періоду часу, тобто 1 ч 12 хв, а за гранично допустимі значення — 0 % від цього періоду часу [6].

Принцип нормування ПЯЕ зображений на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Нормування ПЯЕ

Рекомендована загальна тривалість вимірювань ПЯЕ повинна вибиратися з урахуванням обов'язкового включення робочих і вихідних днів і складає 7 діб [6].

У стандарті вказані вірогідні винуватці погіршення ЯЕ. Відхилення частоти регулюється живлячою енергосистемою і залежить тільки від неї. Окремі ЕП на промислових підприємствах (а тим більше в побуті) не можуть зробити впливу на цей показник, оскільки потужність їх несумісно мала в порівнянні з сумарною потужністю генераторів електростанцій енергосистеми. Коливання напруги, несиметрія і несинусоїдальність напруги викликаються, в основному, роботою окремих потужних ЕП на промислових підприємствах, і лише величина цих ПЯЕ залежить від потужності живлячої енергосистеми в даній точці підключення споживача. Відхилення напруги залежать як від рівня напруги, яка подається енергосистемою на промислові підприємства, так і від роботи окремих промислових ЕП, особливо з великим споживанням реактивної потужності. Тому питання ЯЕ слід розглядати в безпосередньому зв'язку з питаннями компенсації реактивної потужності. Тривалість провалу напруги, імпульсна напруга, коефіцієнт тимчасового перенапруження, як вже наголошувалося, обумовлюються режимами роботи енергосистеми.

У таблиці 1.1. приведені властивості електричної енергії, показники їх характеризуючі і найвірогідніші винуватці погіршення ЯЕ [6]. Стандартом встановлюються способи розрахунку і методики визначення ПЯЕ і допоміжних параметрів, вимоги до погрішностей вимірювань і інтервалів усереднювання ПЯЕ, які повинні реалізовуватися в приладах контролю ЯЕ при вимірюваннях показників і їх обробці.

Таблиця 1.1- Властивості електричної енергії

Властивість електричної енергії	Показник якості електричної енергії	Найбільш ймовірне джерело погіршення ЯЕ
---------------------------------	-------------------------------------	---

Відхилення напруги	1. Стале відхилення напруги δU_y	Електропостачальна організація
--------------------	--	--------------------------------

Продовження таблиці 1.1

Властивість електричної енергії	Показник якості електричної енергії	Найбільш ймовірне джерело погіршення ЯЕ
Коливання напруги	1. Розмах зміни напруги δU_t 2. Доза флікера P_t	Споживач зі змінним навантаженням
Несинусоїдальність напруги	1. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U 2. Коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$	Споживач з нелінійним навантаженням 3
Несиметрія трифазної системи напруги	1. Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} 2. Коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності K_{0U}	Споживач з несиметричним навантаженням 3
Відхилення частоти	1. Відхилення частоти Δf	Електропостачальна організація
Провал напруги	1. Тривалість провалу напруги $\Delta t_{\text{п}}$	Електропостачальна організація
Імпульс напруги	1. Імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$	Електропостачальна організація
Тимчасова перенапруга	1. Коефіцієнт тимчасового перенапруження $K_{\text{пер}U}$	Електропостачальна організація

Відхилення напруги. Відхилення напруги від номінальних значень відбуваються через добові, сезонні і технологічні зміни електричного навантаження споживачів; зміни потужності компенсуючих пристроїв; регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистем; зміни схеми і параметрів електричних мереж.

Відхилення напруги визначається різницею між діючим U і номінальним $U_{\text{ном}}$ значеннями напруги, В:

$$\delta U = U - U_{\text{нн}} \quad (1.1)$$

або, %

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{нн}}}{U_{\text{нн}}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

Стале відхилення напруги δU_y рівне, % [6]:

$$\delta U_o = \frac{U_o - U_{\text{нн}}}{U_{\text{нн}}} \cdot 100\% , \quad (1.3)$$

де U_y - стале (діюче) значення напруги за інтервал усереднювання, В.

У електричних мережах однофазного струму діюче значення напруги визначається як значення напруги основної частоти $U_{(1)}$ без урахування вищих гармонійних складових напруги, а в електричних мережах трифазного струму — як діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти $U_{1(1)}$ формули для їх визначення приведені в [6].

Стандартом нормуються відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії. Нормально допустимі і гранично допустимі значення сталого відхилення напруги рівні відповідно ± 5 і ± 10 % від номінального значення напруги і в точках загального приєднання споживачів електричної енергії повинні бути

встановлені в договорах енергопостачання для годин мінімуму і максимуму навантажень в енергосистемі з урахуванням необхідності виконання норм стандарту на виводах приймачів електричної енергії відповідно до нормативних документів .

Коливання напруги. Коливання напруги викликаються різкою зміною навантаження на даній ділянці електричної мережі, наприклад, включенням асинхронного двигуна з великою кратністю пускового струму, технологічними установками з швидкозмінним режимом роботи, які супроводжуються поштовхами активної і реактивної потужності, такими, як привід реверсивних прокатних станів, дугові сталеплавильні печі, зварювальні апарати і т.п.

Коливання напруги характеризуються двома показниками [6]:

- розмахом зміни напруги;
- дозою флікера.

Розмах зміни напруги δU_t обчислюють по формулі, %

$$\delta U_t = \frac{U_i - U_{i+1}}{U_{\hat{i}\hat{i}}} \cdot 100\% , \quad (1.4)$$

де U_i, U_{i+1} - значення наступних один за іншим екстремумів (або екстремуму і горизонтальної ділянки) огибаючої середньоквадратичних значень напруги, відповідно до рисунку 1.2. (Огибаючою середньоквадратичних значень напруги називається ступінчата часова функція, створена середньоквадратичними значеннями напруги, дискретно визначеними на кожному на півперіоді основної частоти).

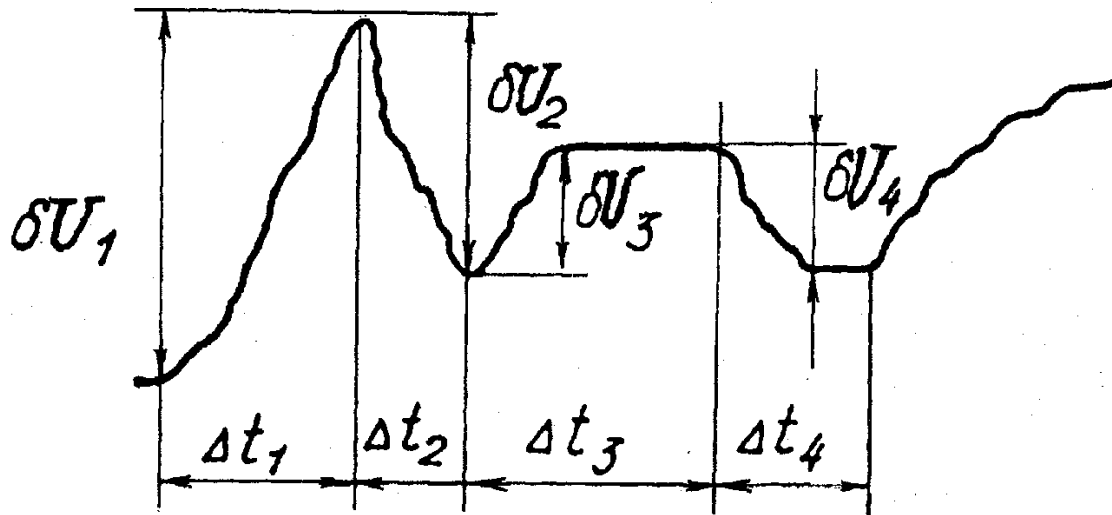


Рисунок 1.2. Коливання напруги (п'ять розмахів напруги за 12 с)

Частота повторення змін напруги $F_{\delta U_t}$ (1/с, 1/хв) визначається виразом:

$$F_{\delta U_t} = m/T$$

(1.5)

де m - число змін напруги за час T ;

T - інтервал часу вимірювання, що приймається рівним 10 хв.

Якщо дві зміни напруги відбуваються з інтервалом меншим 30 мс, то їх розглядають як одну [6].

Інтервал часу між змінами напруги рівний:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i,i+1} - t_i \quad (1.6)$$

Оцінка допустимості розмахів зміни напруги (коливань напруги) здійснюється за допомогою кривих залежності допустимих розмахів коливань від частоти повторень змін напруги або інтервалу часу між подальшими змінами напруги.

Гранично допустимі значення розмаху зміни напруги δU_t визначаються в точці загального приєднання до електричних мереж по кривих, наведених в ГОСТ. Ці залежності мають строгий енергетичний сенс - величини, пропорційні квадратам її ординат, характеризують середнє значення потужності коливань напруги і

пропорційне йому значення коливань світлового потоку (для флікера!), безболісно сприйнятим зоровим аналізатором людини протягом 10-15 хв.

ЯЕ в точці загального приєднання при періодичних коливаннях напруги, що мають форму меандра (прямокутну) (див. рис 3.2) вважають відповідним вимогам стандарту, якщо виміряне значення розмаху змін напруги не перевищує значень, визначуваних по кривих рисунку 1.3 для відповідної частоти повторення змін напруги $F_{\delta U_t}$, або інтервалу між змінами напруги $\Delta t_{i,i+1}$.

Аналітичні методи оцінки відповідності коливань напруги з формою, відмінною від меандра, встановленим нормам приведені в [6].

Граничне допустиме значення суми сталого відхилення напруги δU_y , і розмаху змін напруги δU_t в точках приєднання до електричних мереж напругою 0,38 кВ рівно $\pm 10\%$ від номінальної напруги [6].

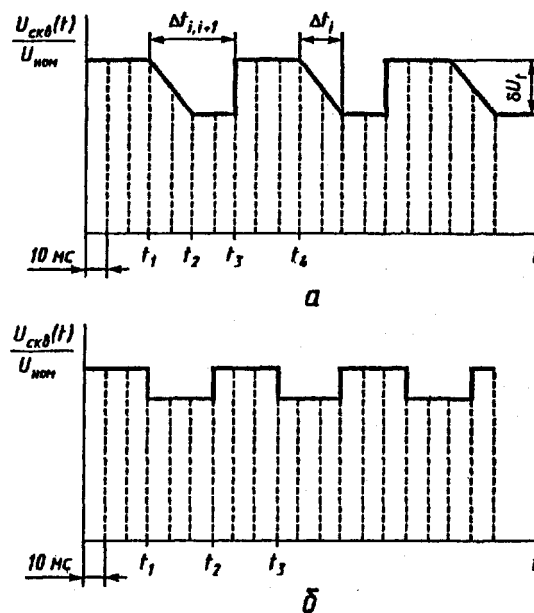


Рисунок 1.3 - Коливання напруги довільної форми (а) і що мають форму меандра (б).

Доза флікера - це міра сприйнятливості людини до дії коливань світлового потоку, викликаних коливаннями напруги в живлячій мережі, за встановлений проміжок часу.

Стандартом встановлюється короткочасна (P_{St}) і тривала доза флікера (P_{Lt}) (короткочасну визначають на інтервалі часу спостереження, рівному 10 хв, тривалу -

на інтервалі 2 год). Дозу флікера (короткочасну і тривалу) при коливаннях напруги будь-якої форми визначають по формулах, приведених в [6]. Початковими даними для розрахунку є рівні флікера, вимірювані за допомогою флікерметра - приладу, в якому моделюється крива чутливості (амплітудно-частотна характеристика) органу зору людини.

ЯЕ по дозі флікера відповідає вимогам стандарту, якщо короткочасна і тривала дози флікера, визначені шляхом вимірювання протягом 24 год або розрахунку, не перевищують гранично допустимих значень: для короткочасної дози флікера - 1,38 і для тривалої - 1,0 (при коливаннях напруги з формою, відмінною від меандра) [6].

Гранично допустиме значення для короткочасної дози флікера в точках загального приєднання споживачів електроенергії, що мають в своєму розпорядженні лампи розжарювання в приміщеннях, де потрібна значна зорова напруга, рівне 1,0, а для тривалої - 0,74, при коливаннях напруги з формою, відмінною від меандра.

Несинусоїдальність напруги. В процесі вироблення, перетворення, розподілу і споживання електроенергії мають місце спотворення форми синусоїдальних струмів і напруг. Джерелами спотворень є синхронні генератори електростанцій, силові трансформатори, що працюють при підвищених значеннях магнітної індукції в сердечнику (при підвищеній напрузі на їх висновках) перетворювальні пристрої змінного струму в постійний і ЕП з нелінійними вольт-амперними характеристиками (або нелінійні навантаження).

Спотворення, створювані синхронними генераторами і силовими трансформаторами, малі і не роблять істотного впливу на систему електропостачання і на роботу ЕП. Головною причиною спотворень є вентильні перетворювачі, сталеплавильні електродугові і руднотермічні печі, установки дугової і контактної зварки, перетворювачі частоти, індукційні печі, ряд електронних технічних засобів (телевізійні приймачі, ПЕВМ), газорозрядні лампи і ін. Електронні приймачі електроенергії і газорозрядні лампи створюють при своїй

роботі невисокий рівень гармонійних спотворень на виході, але загальна кількість таких ЕП велика.

З курсу математики відомо, що будь-яку несинусоїдальну функцію $f(\omega t)$ з періодом 2π (наприклад, див. рисунку 1.4), задовольняючи умові Діріхле, можна представити у вигляді суми постійної величини і нескінченного ряду синусоїдальних величин з кратними частотами. Такі синусоїдальні складові називаються гармонійними складовими або гармоніками. Синусоїдальна складова, період якої рівний періоду несинусоїдальної періодичної величини, називається основною або першою гармонікою. Решту складових синусоїд з частотами з другої по n -ну називають вищими гармоніками.

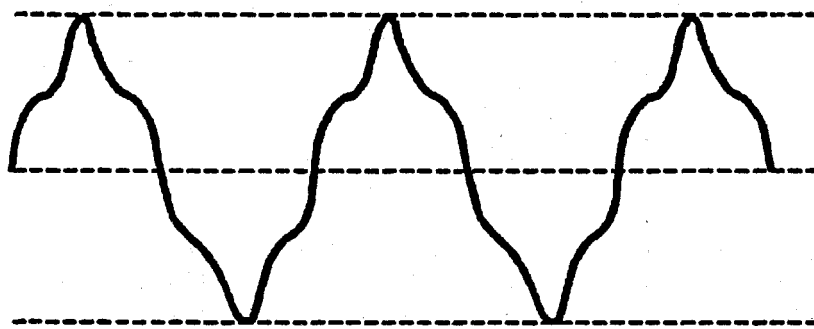


Рисунок 1.4. Несинусоїдність напруги

Несинусоїдність напруги характеризується наступними показниками [6]:

- коефіцієнтом спотворення синусоїдності кривої напруги;
- коефіцієнтом n -ої гармонійної складової напруги.

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги K_U визначається виразом, %

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100, \quad (1.7)$$

де $U_{(n)}$ - діюче значення n -ої гармонійної складової напруги, В;

n - порядок гармонійної складової напруги;

N - порядок останньої з гармонійних складових напруги стандартом, що враховуються, встановлюється $N=40$;

$U_{(1)}$ - діюче значення напруги основної частоти, В.

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{\text{нл}}} 100, \quad (1.8)$$

де $U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга мережі, В.

Коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги рівний, %

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} 100 \quad (1.9)$$

Допускається обчислювати $K_{U(n)}$ по виразу, %

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{\text{нл}}} 100 \quad (1.10)$$

Для обчислення $K_{U(n)}$ необхідно визначити рівень напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням.

Фазну напругу гармоніки в розрахунковій точці мережі знаходять з виразу :

$$U_{(n)} = I_{(n)} U_{\text{нл}} / S_K, \quad (1.11)$$

де $I_{(n)}$ - діюче значення фазного струму n -ої гармоніки;

$U_{\text{нл}}$ - напруга нелінійного навантаження (якщо розрахункова точка співпадає з точкою приєднання нелінійного навантаження, то $U_{\text{нл}}=U_{\text{ном}}$;

$U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга мережі;

S_K - потужність короткого замикання в точці приєднання нелінійного навантаження.

Для розрахунку $U_{(n)}$ необхідно заздалегідь визначити струм відповідної гармоніки, який залежить не тільки від електричних параметрів, але і від виду нелінійного навантаження. Визначення струмів гармонік для різних видів нелінійного навантаження .

Нормально допустимі і гранично допустимі значення K_n в точці загального приєднання до електричних мереж з різною номінальною напругою приведені в таблиці 1.1 ГОСТ. Нормально допустимі значення коефіцієнта n -ї гармонійної складової напруги приведені в таблиці 1.2. ГОСТ.

Гранично допустиме значення коефіцієнта n -ї гармонійної складової напруги обчислюють по формулі:

$$K_{U(n)} = 1,5 K_{U(n)} \quad (1.12)$$

$K_{U(n)}$ -- нормальне допустиме значення коефіцієнта n -ї гармонійної складової напруги, визначуване по таблиці 1.2.

Несиметрія напруги. Найпоширенішими джерелами несиметрії напруги в трифазних системах електропостачання є такі споживачі електроенергії, симетричне багатofазне виконання яких або неможливе, або недоцільне по техніко-економічних міркуваннях. До таких установок відносяться індукційні і дугові електричні печі, тягові навантаження залізниць, виконані на змінному струмі, агрегати електрозварювання, спеціальні однофазні навантаження, освітлювальні установки.

Несиметричні режими напруги в електричних мережах мають місце також в аварійних ситуаціях - при обриві фази або несиметричних коротких замиканнях.

Несиметрія напруг характеризується наявністю в трифазній електричній мережі напруг зворотної або нульової послідовностей, значно менших по величині відповідних складових напруг прямої (основний) послідовності.

Несиметрія трифазної системи напруг виникає в результаті накладення на систему прямої послідовності напруг системи зворотної послідовності, що приводить до змін абсолютних значень фазних і міжфазних напруг. Векторна діаграма несиметричної трифазної системи напруг показана на рисунку 1.5.

Крім несиметрії, що викликається напругою системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія від накладення на систему прямої послідовності напруг системи нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симетричної системи міжфазних напруг. Векторна діаграма накладення на систему прямої послідовності напруг системи нульової послідовності приведена на рисунку 1.6.

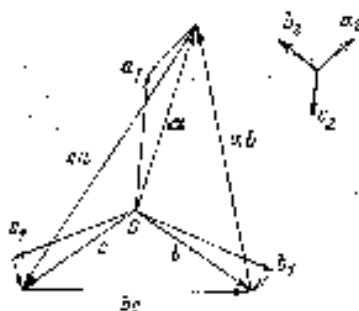


Рисунок 1.5. Векторна діаграма напруг прямої і зворотної послідовності

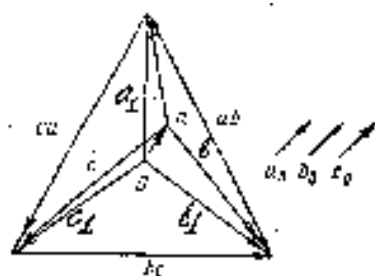


Рисунок 1.6. Векторна діаграма напруг прямої і нульової послідовності

Несиметрія напруг характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруг по зворотній послідовності;
- коефіцієнтом несиметрії напруг по нульовій послідовності.

Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності, %

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} 100 \quad (1.13)$$

де $U_{2(1)}$ - діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В;

$U_{1(1)}$ - діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, В.

Допускається обчислювати K_{2U} виразом, % [6]:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{\text{н.м.}}} 100 \quad (1.14)$$

$U_{\text{н.м.}}$ - номінальне значення міжфазної напруги мережі, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності рівний, % [6]:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} 100, \quad (1.15)$$

де $U_{0(1)}$ - діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В.

Допускається обчислювати K_{0U} по формулі, %

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{\text{ф.н.}}} 100, \quad (1.16)$$

$U_{\text{ф.н.}}$ - номінальне значення фазної напруги, В.

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг по нульовій послідовності проводять в чотирьохпроводній мережі.

Відносна похибка визначення K_{2U} і K_{0U} по формулах (3.15) і (3.16) чисельно рівна значенню відхилень напруги $U_{1(1)}$ від $U_{\text{ном}}$ [6].

Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності в точці загального приєднання до електричних мереж рівні 2,0 і 4,0 % .

Нормовані значення коефіцієнта несиметрії напруг по нульовій послідовності в точці загального приєднання до чотирьохдротяних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ також рівні 2,0 і 4,0 % [6].

Відхилення частоти. Відхилення частоти - різниця між дійсним і номінальним значеннями частоти, Гц

$$\Delta f = f - f_{\text{н}}$$

(1.17)

або, %

$$\Delta f = \frac{f - f_{\text{н}}}{f_{\text{н}}} 100,$$

(1.18)

Стандартом встановлюються нормально і гранично допустимі значення відхилення частоти рівні $\pm 0,2$ Гц і $\pm 0,4$ Гц відповідно.

Провал напруги. До провалів напруги відноситься раптова значна зміна напруги в точці електричної мережі нижче за рівень $0,9 U_{\text{ном}}$, за яким слідує відновлення напруги до первинного або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд (рисунок 1.7).

Характеристикою провалу напруги є його тривалість - Δt_n , рівна:

$$\Delta t_n = t_k - t_n, \quad (1.19)$$

t_k, t_n - початковий і кінцевий моменти часу провалу напруги.

Провал напруги характеризується також завглибшки провалу напруги δU_n - різницею між номінальним значенням напруги і мінімальним діючим значенням

напруги, вираженою в одиницях напруги або у відсотках від його номінального значення. Провал напруги обчислюється по виразах:

$$\delta U_n = U_{\text{н}} - U_{\text{п}} \quad (1.20)$$

або, %

$$\delta U_n = \frac{U_{\text{н}} - U_{\text{п}}}{U_{\text{н}}} 100 \quad (1.21)$$

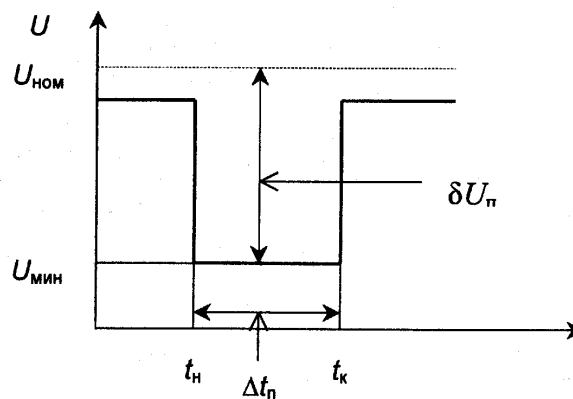


Рисунок 1.7. Провал напруги

Гранично допустиме значення тривалості провалу напруги в електричних мережах напругою до 20 кВ включно рівне 30 с. Тривалість провалу напруги в будь-якій крапці приєднання, що автоматично усувається, до електричних мереж визначається витримками часу релейного захисту і автоматики [6].

Імпульс напруги і тимчасове перенапруження. Спотворення форми кривої живлячої напруги може відбуватися за рахунок появи високочастотних імпульсів при комутаціях в мережі, роботі розрядників і т.д. Імпульс напруги - різка зміна напруги в точці електричної мережі, за якою слідує відновлення напруги до первинного або близького до нього рівня. Величина спотворення напруги при цьому характеризується показником імпульсної напруги (див. рисунку 1.8)

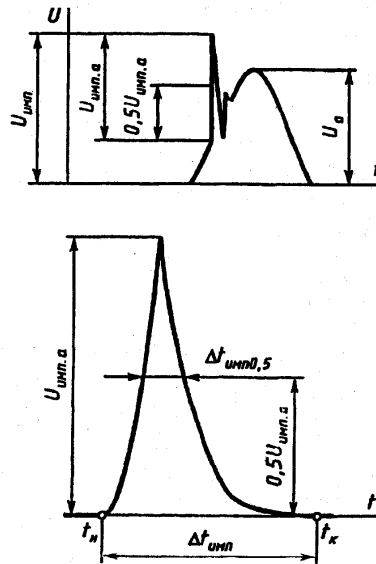


Рисунок 1.8. Параметри імпульсної напруги

Імпульсна напруга у відносних одиницях рівна:

$$\delta U_{\hat{u} \hat{i}} = \frac{U_{\hat{u} \hat{i}}}{\sqrt{2} U_{\hat{i} \hat{i}}} \% , \quad (1.22)$$

де $U_{\text{імп}}$ - значення імпульсної напруги, В.

Амплітудою імпульсу називається максимальне миттєве значення імпульсу напруги. Тривалість імпульсу ($\Delta t_{\text{імп}}$) — це інтервал часу між початковим моментом імпульсу напруги і моментом відновлення миттєвого значення напруги до первинного або близького до нього рівня [6].

Показник - імпульсна напруга стандартом не нормується, але статистика імпульсної напруги для грозових і комутаційних імпульсів електричних мереж енергозабезпечуючих організацій приведена в [6].

Тимчасове перенапруження - підвищення напруги в точці електричної мережі вище $1,1U_{\text{ном}}$ тривалістю більше 10 мс, виникаючі в системах електропостачання при комутаціях або коротких замиканнях (рисунку 1.9).

Тимчасове перенапруження характеризується коефіцієнтом тимчасового перенапруження ($K_{\text{пері}}$): це величина, рівна відношенню максимального значення

огиноючої амплітудних значень напруги за час існування тимчасового перенапруження (U_{amax}) до амплітуди номінальної напруги мережі:

$$K_{i\ddot{a}\partial U} = \frac{U_{\ddot{a}\max}}{\sqrt{2}U_{i\ddot{i}}} \quad (1.23)$$

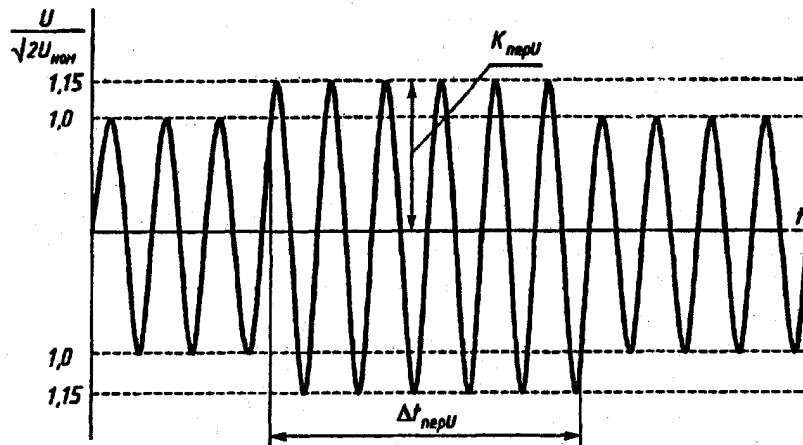


Рисунок 1.9 - Тимчасове перенапруження

Тривалістю тимчасового перенапруження ($\Delta t_{\text{пер}U}$) називається інтервал часу між початковим моментом виникнення тимчасового перенапруження і моментом його зникнення [6].

$$\Delta t_{n\ddot{a}\partial U} = t_{\ddot{e}\ddot{i}\ddot{a}\partial} - t_{n\ddot{i}\ddot{a}\partial} \quad (1.24)$$

Коефіцієнт тимчасового перенапруження стандартом також не нормується. Значення коефіцієнта тимчасового перенапруження в точках приєднання електричної мережі загального призначення залежно від тривалості тимчасових перенапружень не перевищують значень, приведених в таблиці 1.3 [6].

В середньому за рік в точці приєднання можливе виникнення близько 30 тимчасових перенапружень. При обриві нульового провідника в трифазних електричних мережах напругою до 1 кВ, працюючих з глухозаземленою нейтраллю, виникають тимчасові перенапруження між фазою і землею. Рівень таких

перенапружень при значній несиметрії фазних навантажень може досягати значень міжфазної напруги, а тривалість декількох годин [6].

1.3 Вплив впровадження джерел розосередженої генерації на роботу системи електропостачання

Проаналізуємо вплив підключення розподілених джерел генерації на розподільні ЕМ з точки зору їх експлуатації при нормальному режимі [7].

Вплив РГ на регулювання напруг. Радіальні системи розподілу регулюють напругу за допомогою пристроїв регулювання під навантаженням (РПП) на підстанціях` додатково регуляторами лінії на розподільчих лініях та шунтуючих конденсаторах на розподільчих лініях або уздовж лінії. Регулювання напруги засновано на потоку потужності в одну сторону, де регулятори оснащені компенсацією падіння лінії. Підключення джерел розосередженої генерації може призвести до змін в профілі напруги уздовж розподільчих ліній шляхом зміни напрямку і величини активної та реактивної потужності потоків. Тим не менш, вплив РГ на регулювання напруги може бути позитивним чи негативним в залежності від розподільчої системи і розподільчих характеристик генератора, а також місця розташування РГ.

Вплив РГ на втрати. Одним з основних впливів розподіленої генерації є зменшення втрат в розподільчій мережі. Розташування одиниць РГ є важливим критерієм, який повинен бути проаналізований, щоб досягти більш високої надійності системи зі зниженими втратами.

Визначення місць оптимального розташування РГ можна отримати за допомогою програмного аналізу потоків навантаження, який дозволяє визначити оптимальне місце встановлення РГ в рамках системи з метою зниження втрат. Наприклад: якщо розподільчі лінії мають високі втрати, додавши ряд джерел розподіленої генерації невеликої потужності, ми отримаємо позитивний ефект щодо зниження втрат, що в свою чергу дає великі переваги для системи. З іншого боку, якщо додаються більші одиниці, то вони повинні бути встановлені з урахуванням обмежень лінії електропередачі. Наприклад: ємність живлячої лінії може бути

обмежена, оскільки повітряні лінії і кабелі мають теплові характеристики, які не можна перевищувати.

Більшість джерел РГ належить споживачам. Оператори мережі не можуть вирішувати де встановлювати установки РГ. Зазвичай втрати зменшуються коли джерело електроенергії розташовується ближче до споживача. Однак локальне збільшення потоку потужності в низьковольтних мережах може мати небажані наслідки, пов'язані з тепловими характеристиками.

Вплив РГ на вищі гармоніки. Вищі гармоніки певною мірою завжди присутні в енергосистемах. Вони можуть бути викликані нелінійністю в обмотці збудження трансформатора або навантаженнях, таких як люмінесцентні лампи, випрямлячі, частотно-регульовані приводи, перемикачі режимів енергетичного обладнання, печі та інше обладнання.

РГ також може бути джерелом вищих гармонік в мережі. Гармоніки можуть бути або з самого генератора (синхронного генератора) або від обладнання силової електроніки, такого як інвертори.

Обертові генератори є ще одним джерелом вищих гармонік, які залежать від конструкції обмотки генератора (крок обмотки), нелінійності осердя, заземлення та інших факторів, які можуть призвести до значного поширення гармонік.

Розташування заземлення генератора і трансформатора має основний вплив на обмеження проникнення гармонік. Схеми заземлення можуть бути вибрані для усунення або зменшення введення третьої гармоніки до системи живлення. Це, як правило, обмежує її тільки на стороні джерел РГ.

Порівнюючи вплив вищих гармонік від РГ з іншими ефектами, які дає РГ на систему живлення, можна зробити висновок, що це нетака вже й велика проблема. Аналіз сучасного стану електроенергетичної галузі України показує, що необхідність її модернізації [7] тісно пов'язана із розвитком систем електропостачання. Враховуючи постійно зростаючий попит на електричну енергію, зростає необхідність введення в дію нових генеруючих потужностей. Широке впровадження в останній час, так званих, розосереджених джерел електричної

енергії [7] перетворює централізовану пасивну систему електропостачання в децентралізовану.

В свою чергу, встановлення такої генерації, завдяки появі великої кількості додаткових взаємозв'язків, суттєво впливає на інформаційні потоки в системах електропостачання і, в кінцевому випадку, на якість електричної енергії [7]. Тому аналіз такого впливу є актуальною науково-практичною задачею.

Як відомо, впровадження джерел розосередженої генерації характеризується різким збільшенням силових електронних систем, що приводить до погіршення якості електричної енергії [7]. Причинами такого погіршення, наряду із впровадженням джерел розосередженої генерації (генерація в електричну мережу гармонік, інтер- та субгармонік[7]), є також наявність у споживачів потужних нелінійних, несиметричних навантажень із різко-змінним режимом роботи. До таких навантажень відносяться дугові електро-сталеплавильні печі, потужні прокатні стани, електрозварні пристрої та інше.

Дані навантаження негативно впливають на якість електричної енергії систем електропостачання, до яких вони підключені. Це обумовлено тим, що характер споживання ними активних і реактивних потужностей відповідає їх різко-змінним, повторно-короткочасним режимам роботи, що призводить до коливань напруги [7] та флікеру. Коливання напруги, у свою чергу, призводить до модуляції у часі амплітуд і фаз складових струму як основної, так і вищих гармонік, які генеруються у електричну мережу.

У зв'язку з цим у роботі розглядається вплив на якість електричної енергії (доза флікера) гармонік, інтергармонік та субгармонік, які генерують у електричну мережу розосереджені джерела енергії.

Висновки до розділу

До джерел розосередженої генерації відносять установки малої потужності (до 10 МВт), що розташовані безпосередньо поблизу споживача, та можуть бути під'єднані до енергосистеми. До джерел розосередженої генерації відносяться: фотоелектричні елементи, вітрові установки, малі ГЕС, дизельгенератори.

У зв'язку з цим у роботі розглядається вплив на якість електричної енергії (доза флікера) гармонік, інтергармонік та субгармонік, які генерують у електричну мережу розосереджені джерела енергії.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ГАРМОНІЧНИЙ СКЛАД ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ДОЗУ ФЛІКЕРА

2.1 Побудова моделі електричної мережі із наявністю джерела розосередженої генерації

Для побудова моделі електричної мережі із наявністю джерела розосередженої генерації, використано модель електросистеми, що була створена за допомогою Matlab Simulink (див. рис. 2.1).

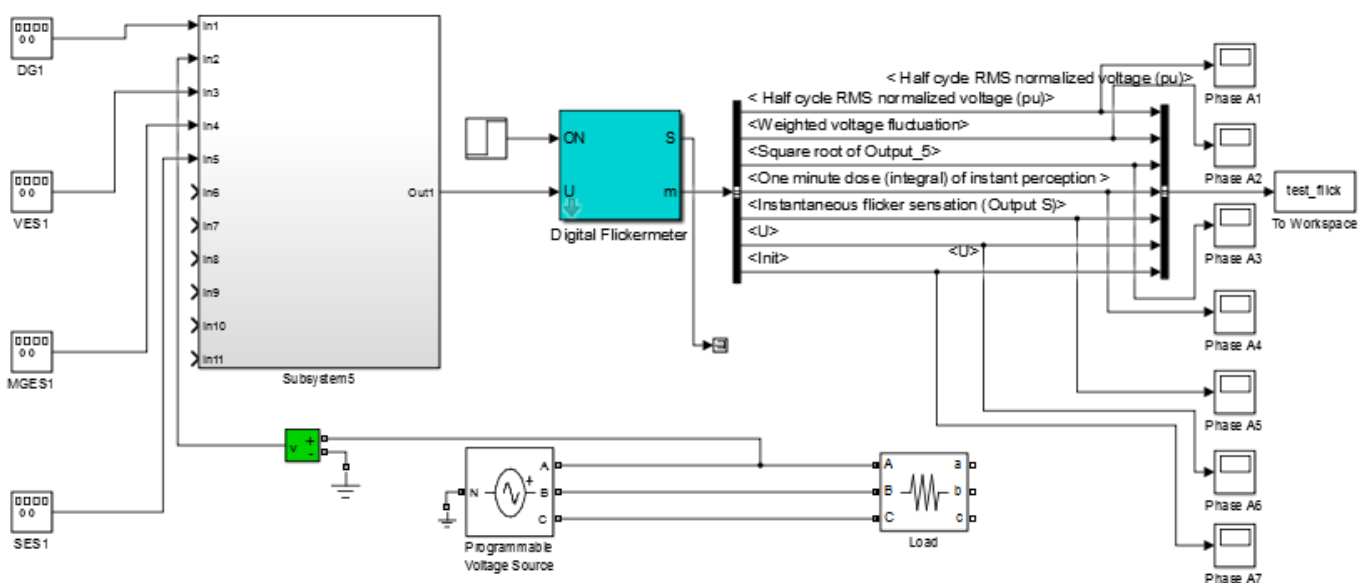


Рисунок 2.1 – Схема моделі електросистеми

Programmable voltage source – джерело синусоїдальної напруги з параметрами $U=220\text{ В}$, $f=50\text{ Гц}$.

Load – навантаження $R=10\text{ Ом}$.

DG, VES, SES, MGES – заводи, що генерують альтернативні джерела електричної енергії.

SES та VES мають синусоїдальну форму сигналу.

MGES має форму square, що зображено на рисунку 2.2.

DG має форму сигналу sawtooth, що зображено на рисунку 2.3.

Programmable voltage source генерує ідеальну синусоїду і живить навантаження Load. Вольтметр проводить вимірювання напруги та в блоці Subsystem складається отриманий сигнал з заводами, що задаються блоками DG, VES, SES, MGES і сумарний сигнал аналізується в блоці Digital Flickermeter, з флікерметра дані виводяться на осцилографи.

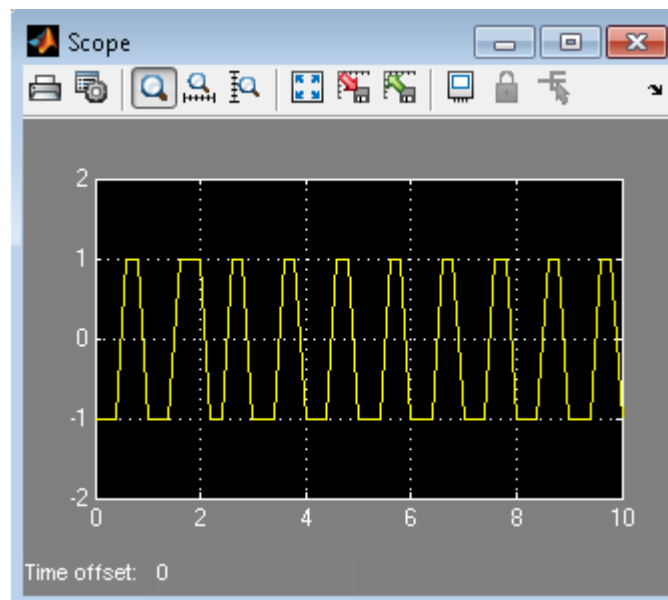


Рисунок 2.2 – Форма сигналу square

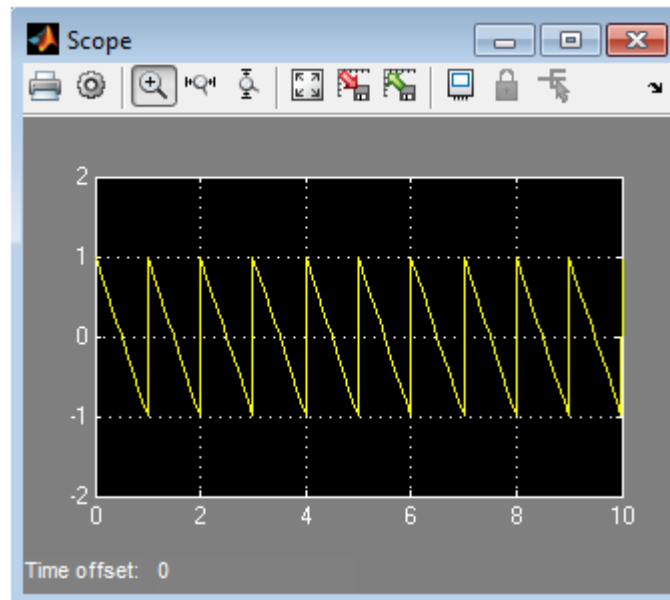


Рисунок 2.3 – Форма сигналу sawtooth

Digital Flickermeter – модель флікерметра, що розроблена згідно вимог стандарту ІЕС-61000-4-15 показана на рисунку 2.4.

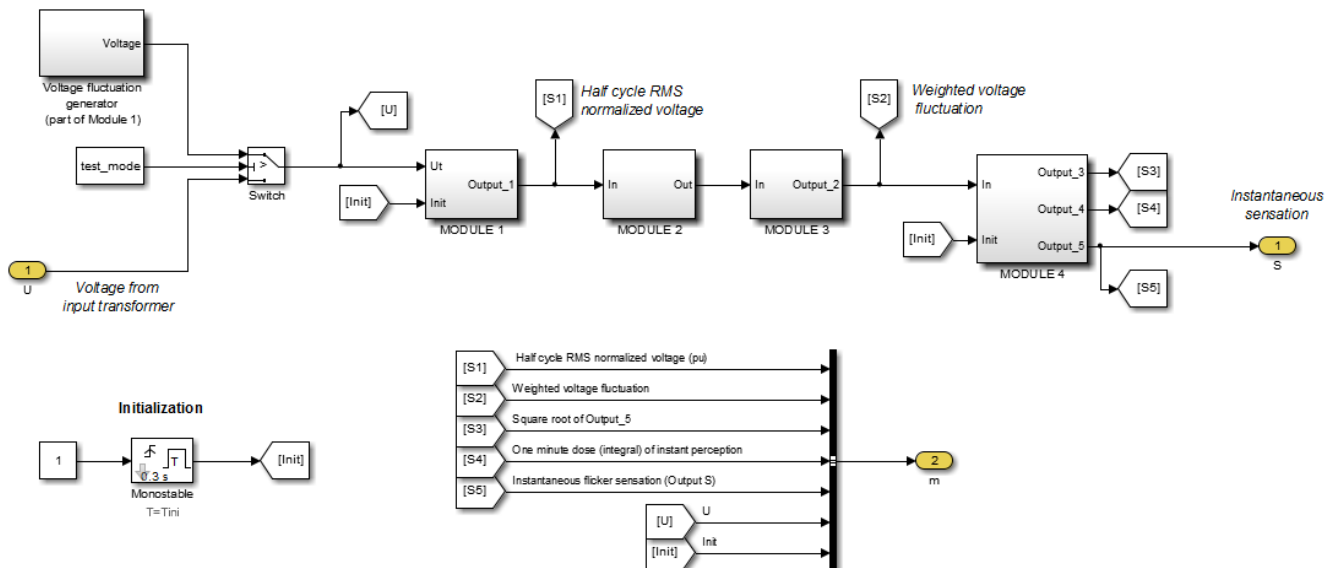


Рисунок 2.4 – Модель флікерметра

Блок 1 (Module 1) адаптер напруги. Блок 1 включає генератор сигналів для калібрування приладу в процесі експлуатації і перетворювач вхідної напруги, який приводить усереднене середньоквадратичне значення вхідної напруги основної частоти до внутрішнього опорного рівня напруги приладу. Тим самим виміри флікера можуть бути здійснені незалежно від дійсного рівня напруги на вході

приладу і виражені в процентному відношенні. Відведення первинної обмотки вхідного трансформатора вибирають так, щоб привести сигнал на вході перетворювача напруги до необхідної опорної напруги приладу.

Блок 2 (Module 2) квадратичний демодулятор. Призначення блоку 2 - відтворення коливань напруги шляхом піднесення до квадрату вхідної напруги, приведеної до внутрішнього опорного рівня напруги приладу для імітації характеристик лампи.

Блок 3 і 4 (Module 3 and 4) врівноважуючий фільтр, фільтр низьких і високих частот, квадратичний підсилювач. Блок 3 складається з двох селективних фільтрів, включених послідовно і перемикача межі вимірювання.

Перший фільтр пригнічує постійну складову вихідної напруги квадратичного демодулятора і змінну складову подвоєної частоти мережі (100 Гц).

Другий фільтр є врівноважуючим фільтром, який моделює частотну характеристику газонаповненої електричної лампи (60 Вт, 230 В) з біспіральною ниткою розжарення в комбінації із зоровою системою людини при коливаннях напруги синусоїдальної форми. Частотна характеристика фільтру відповідає порогу сприйнятливості людини до коливань світлового потоку.

Блок 4 складається з облаштування квадратичної обробки сигналів і низькочастотного фільтру першого порядку. Сприйняття флікера людиною з урахуванням характеристик лампи, ока і мозку людини моделюється нелінійній характеристикою, що забезпечується блоками 2, 3 і 4. При цьому функціонування блоку 3 ґрунтується на відображенні кривої сприйнятливості людини при синусоїдальних коливаннях напруги; відповідне врівноваження при несинусоїдальних і випадкових коливаннях напруги досягається за рахунок вибору комплексної передатної функції блоків 3 і 4. Завдяки цьому забезпечується правильне функціонування приладу при періодичних коливаннях напруги, що мають форму меандру, і при коливаннях напруги перехідного характеру.

На виході блоку 4 формується миттєве значення флікера.[6]

2.2 Дослідження гармонічного складу електричної енергії, що генерується сонячним, дизель-генератором, вітровою та малою гідроелектростанцією

Вхідні дані для першого дослідження наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані для першого дослідження

	1-ша гармоніка (50 Гц), В	3-я гармоніка (150 Гц), В	5-а гармоніка (250 Гц), В
СЕС	220	3,96 (1,8%)	2,2 (1%)
ДГ	220	15,4 (7%)	6,6 (3%)
ВЕС	220	13,2 (6%)	8,8 (4%)
МГЕС	220	11 (5%)	5,06 (2,3%)

Пояснення до таблиці 2.1:

СЕС – сонячна електростанція

ДГ – дизель генератор

ВЕС – вітроелектростанція

МГЕС – мала гідроелектростанція

Задавши такі дані завад, що генерують альтернативні джерела електроенергії ми отримали результати, що були занесені до таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Результати проведених досліджень

№	Характеристика	Гармоніки	P_{st}
1	ВЕС	1+3	0,0101
2	ВЕС	1+5	0,0102
3	ВЕС	1+3+5	0,0102
4	СЕС	1+3	0,0102
5	СЕС	1+5	0,0102

6	СЕС	1+3+5	0,0102
7	МГЕС	1+3	0,0102
8	МГЕС	1+5	0,0105
9	МГЕС	1+3+5	0,0106
10	ДГ	1+3	0,0102
11	ДГ	1+5	0,0103
12	ДГ	1+3+5	0,0103

Пояснення до таблиці 2.2:

№ - номер дослідження.

Характеристика – вид альтернативного джерела електричної енергії або їх комбінація між собою.

Гармоніки- гармоніки, що генерують дані джерела (їх амплітуда наведена у таблиці 2.1).

P_{st} – короткочасна доза флікера.

Висновки до досліді 1

Проаналізувавши результати першого досліді, можна зробити висновок, що вищі гармоніки не мають значного впливу на дозу флікера.

2.3 Дослідження взаємного впливу різних джерел енергії на гармонічний склад електричної енергії на дозу флікера

Вхідні дані для другого досліді наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вхідні дані для другого досліді

	1-ша гармоніка (50 Гц), В	3-я гармоніка (150 Гц), В	5-а гармоніка (250 Гц), В
СЕС	220	3,96 (1,8%)	2,2 (1%)
ДГ	220	15,4 (7%)	6,6 (3%)

ВЕС	220	13,2 (6%)	8,8 (4%)
МГЕС	220	11 (5%)	5,06 (2,3%)

Пояснення до таблиці 2.3:

СЕС – сонячна електростанція

ДГ – дизель генератор

ВЕС – вітроелектростанція

МГЕС – мала гідроелектростанція

Задавши такі дані завад, що генерують альтернативні джерела електроенергії ми отримали результати, що були занесені до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати проведених досліджень

№	Характеристика	Гармоніки	P _{st}
1	ВЕС+СЕС	1+3	0,0101
2	ВЕС+СЕС	1+5	0,0102
3	ВЕС+СЕС	1+3+5	0,0102
4	ВЕС+МГЕС	1+3	0,0102
5	ВЕС+МГЕС	1+5	0,0105
6	ВЕС+МГЕС	1+3+5	0,0105
7	ВЕС+ДГ	1+3	0,0102
8	ВЕС+ДГ	1+5	0,0103
9	ВЕС+ДГ	1+3+5	0,0105
10	СЕС+МГЕС	1+3	0,0102
11	СЕС+МГЕС	1+5	0,0105
12	СЕС+МГЕС	1+3+5	0,0105
13	СЕС+ДГ	1+3	0,0102
14	СЕС+ДГ	1+5	0,0103

15	СЕС+ДГ	1+3+5	0,0103
16	МГЕС+ДГ	1+3	0,0102
17	МГЕС+ДГ	1+5	0,0103
18	МГЕС+ДГ	1+3+5	0,0103
19	ВЕС+СЕС+МГЕС	1+3	0,0102
20	ВЕС+СЕС+МГЕС	1+5	0,0105
21	ВЕС+СЕС+МГЕС	1+3+5	0,0105
22	ВЕС+СЕС+ДГ	1+3	0,0103
23	ВЕС+СЕС+ДГ	1+5	0,0103
24	ВЕС+СЕС+ДГ	1+3+5	0,0107
25	ВЕС+МГЕС+ДГ	1+3	0,0102
26	ВЕС+МГЕС+ДГ	1+5	0,0103
27	ВЕС+МГЕС+ДГ	1+3+5	0,0103

Продовження таблиці 2.4 – Результати проведених досліджень

№	Характеристика	Гармоніки	P_{st}
28	СЕС+МГЕС+ДГ	1+3	0,0102
29	СЕС+МГЕС+ДГ	1+5	0,0103
30	СЕС+МГЕС+ДГ	1+3+5	0,0103
31	ВЕС+СЕС+МГЕС+ДГ	1+3	0,0101
32	ВЕС+СЕС+МГЕС+ДГ	1+5	0,0103
33	ВЕС+СЕС+МГЕС+ДГ	1+3+5	0,0103

Пояснення до таблиці 2.4:

№ - номер дослідження.

Характеристика – вид альтернативного джерела електричної енергії або їх комбінація між собою.

Гармоніки- гармоніки, що генерують дані джерела (їх амплітуда наведена у таблиці 1).

P_{st} – короткочасна доза флікера.

Висновки до досліджу 2

Проаналізувавши результати другого дослідження, можна зробити висновок, що вищі гармоніки при взаємному впливі не мають значного впливу на дозу флікера.

2.4 Дослідження впливу на дозу флікера інтергармонічних та субгармонічних коливань

Вхідні дані для третього дослідження наведені у таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Вихідні дані для третього дослідження

	Частота коливань, Гц	Амплітуда коливань, В
СЕС	60	0,22
ДГ	56	0,26
ВЕС	63	0,311
МГЕС	54	0,19

Задавши такі дані завад, що генерують альтернативні джерела електроенергії ми отримали результати, що були занесені до таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Результати проведених досліджень

№	Характеристика	P_{st}
1	СЕС	0,5231
2	ДГ	0,1938
3	ВЕС	0,5773
4	МГЕС	0,1751
5	СЕС+ДГ	0,7072
6	СЕС+ВЕС	1,0894
7	СЕС+МГЕС	0,6882
8	ДГ+ВЕС	0,7613
9	ДГ+МГЕС	0,3584
10	ВЕС+МГЕС	0,7441

1 1	СЕС+ДГ+ВЕС	1,2736
1 2	СЕС+ДГ+МГЕС	0,8712
1 3	СЕС+ВЕС+МГЕС	1,2591
1 4	ДГ+ВЕС+МГЕС	0,9285
1 5	СЕС+ДГ+ВЕС+МГЕС	1,4377

Висновки до розділу

Проаналізувавши результати, що отримані в результаті дослідження (наведені в таблиці 2.6) можна зробити висновок, що значно більший вплив на дозу флікера мають інтергармонічні коливання напруги. Альтернативні джерела електричної енергії з вхідними даними, що наведені у таблиці 2.3 можна використовувати з належною якістю електричної енергії з точки зору дози флікера (P_{st} не перевищує 1). Згідно результатів можна зробити висновок, що одночасне використання сонячної електростанції та дизель-генератора або вітроелектростанції або малої гідроелектростанції є допустимим (P_{st} не перевищує 1), а, наприклад, сонячної електростанції разом з вітроелектростанцією та малою гідроелектростанцією є недопустимим (P_{st} перевищує 1).

Таблиця 2.7 – Вихідні дані для третього дослідження

	Частота коливань, Гц	Амплітуда коливань, В
СЕС	41	0,215
ДГ	28	0,69
ВЕС	37	0,311
МГЕС	32	0,342

Таблиця 2.8 - Результати проведених досліджень

	Характеристика	P_{st}
	СЕС	0,567
	ДГ	0,5415
	ВЕС	0,5788
	МГЕС	0,4058
	СЕС+ДГ	1,0738
	СЕС+ВЕС	1,1107
	СЕС+МГЕС	0,936
	ДГ+ВЕС	1,1102
	ДГ+МГЕС	0,9354
0	ВЕС+МГЕС	0,9749
1	СЕС+ДГ+ВЕС+МГЕС	2,0397

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що дані субгармонійні коливання з даними амплітудами не виходять за межі норми, тобто доза флікера менше одиниці. Але сумісне використання джерел з даними субгармонійними коливаннями допускається лише в деяких випадках (коли P_{st} менше 1).

3 ВИЗНАЧЕННЯ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТУПЕНЮ СПОТВОРЕННЯ ФОРМИ СИГНАЛУ

3.1 Огляд алгоритмів визначення гармонічного складу та ступеню спотворення форми сигналу

На даний час існує цілий ряд методів аналізу форми хвилі струму і напруги. Оцінка їх ефективності передбачає визначення точності і швидкодії. Широко використовуваним методом проведення гармонічного аналізу є дискретне

перетворення Фур'є (ДПФ), в основі якого лежить уявлення про те, що будь-яку періодичну функцію можна представити у вигляді суми окремих гармонічних складових (синусоїд і косинусоїд з різними амплітудами, частотами) – розкладання в ряд Фур'є.

Для прискорення проведення ДПФ був розроблений алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). На даний час алгоритм ШПФ зайняв майже монопольне положення не лише серед алгоритмів спектрального оцінювання, але і в інших областях обробки інформації. Проте алгоритми Фур'є мають декілька джерел методичних похибок, які призводять до низької точності результатів гармонічного аналізу [8]. Головними недоліками є обмеженість частотного розділення і точності оцінки частоти окремих гармонічних компонент.

Для підвищення точності проведення ШПФ застосовується ряд додаткових математичних операцій. Так, для виключення ефекту розсіяння [9] (у разі коли довжина вибірки сигналу не дорівнює періоду аналізованої функції) проводиться синхронізація частоти дискретизації з частотою досліджуваного сигналу, доповнення нулями початкової вибірки аналізованого сигналу, або застосування часових чи спектральних вікон [10]. Ефективним засобом зменшення ефекту спектральних витоків також є застосування віконних функцій з інтерполяційним алгоритмом [11, 12].

Проте усі ці способи не збільшують частотну роздільність. Так застосування часових або спектральних вікон дозволяє зменшити ефект розсіяння за рахунок погіршення частотного розділення (у зв'язку з нехтуванням частиною інформації про функцію, яка аналізується), а при доповненні початкової вибірки нулями збільшується вибіркковість оцінювання частот вузькосмугових спектральних піків за рахунок зменшення нерівномірності амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) і, відповідно, похибок, які пов'язані з її нерівномірністю.

В останній час з'явилися роботи, які спрямовані на удосконалення (модернізацію) існуючих алгоритмів (методів) визначення якісних характеристик електроспоживання загалом, і гармонійного аналізу, зокрема.

Так, в [13, 14 – 15] представлено просторово-часову модель визначення амплітуди і фази основної частоти і її гармонік в реальному масштабі і несинусоїдальних режимах. Ефективними були дослідження в області визначення середньоквадратичних значень гармонік, що показують задовільну апроксимацію основної частоти і її амплітуди [16, 17]. Також відоме застосування фільтру Кальмана для оцінки гармонічного складу сигналу. Даний метод, який визначається як модель в просторі станів для відстежування амплітуди і фази основної частоти і її гармонік, був запропонований в [18]. Широко відомі також такі підходи до проведення гармонічного аналізу, як метод найменших квадратів [19], Проні [20], статистичного аналізу [21, 22] гребінчастих фільтрів і тому подібне.

Як було доведено вище, енергія четвертого рівня вейвлет-декомпозиції характеризує наявність гармонічних спотворень у електричній мережі. Що стосується їх ідентифікації і оцінювання, то це не так однозначно. Для виключення впливу різних факторів (шуму, короткочасних коливань) нами запропоновано енергію вейвлет-коефіцієнтів четвертого рівня вейвлет-декомпозиції порівнювати з їх пороговим значенням. Якщо вона нижча – величина гармонічних спотворень вважається незначною, в іншому випадку – вона суттєва. Відомо також, що застосування КМА (алгоритму Малла) призводить до виникнення нерівномірних частотних діапазонів (на кожному рівні декомпозиції відкидається високочастотна складова сигналу – декомпозиції піддається тільки апроксимуюча частина), які не дозволяють визначати середньоквадратичні значення окремих гармонічних компонент. Тобто, для проведення гармонічного аналізу за допомогою вейвлет-перетворення необхідним є застосування пакетного вейвлет-перетворення. На відміну від застосування алгоритму Малла, при пакетному вейвлет-перетворенні декомпозиції на всіх рівнях піддаються як апроксимуючі, так і деталізуючі коефіцієнти, і, відповідно, це створює рівномірні рівневі частотні діапазони.

Як відомо, ІЕС 61000-4-7 [23], ГОСТ Р 51317.4.7 [24] визначають контрольно-вимірювальну апаратуру для вимірювання гармонік і інтергармонік електричних струмів і напруги в системах електропостачання. У якості методу вимірювань передбачається використання ДПФ із застосуванням часового вікна Хеннінга за

умов втрати синхронізації. При цьому, тривалість часового інтервалу виміру повинна бути рівна 10-ти періодам основної частоти при прямокутному вікні зважування. Не виключаються також і інші принципи аналізу, такі як застосування банків цифрових фільтрів або вейвлет-перетворення.

Вперше застосування вейвлет-аналізу в електричних мережах було запропоновано Р. Riberio в 1994 році [25]. На відміну від перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз при вимірі частотно-часових змін спектральних компонент інформаційного сигналу має іншу частотно-часову роздільність. У зв'язку з цим, в даній роботі проведений порівняльний аналіз розрахунку гармонічних компонент відповідно до вимог [23, 26] за допомогою ДПФ і вейвлет-аналізу.

Як стверджується в [27, 17], для забезпечення більш точного представлення гармонік за наявності нелінійних навантажень в системі електропостачання, в групі гармонік включаються проміжні спектральні лінії. При цьому, середньоквадратичне значення гармонічної групи дорівнюватиме кореню квадратному з суми квадратів середньоквадратичних значень гармонічної складової і спектральних складових, що примикають до неї, які відповідають цій тривалості тимчасового інтервалу виміру. Тобто, для оцінки гармонік результати проведення ДПФ мають бути згруповані відповідно до наступної формули :

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2}, \quad (3.1)$$

де $G_{g,n}$ – середньоквадратичне значення гармонічної групи порядку n ;

C_{k+i} – середньоквадратичне значення спектральної складової відповідної частотної позиції ДПФ;

n – порядок гармоніки рівний $\frac{k}{n}$;

k – компонент Фур'є; N – число періодів у вікні години вимірів ($N=10$).

Підсумовування квадратів діючих значень гармонік можливе у зв'язку з тим, що момент взаємної кореляції між гармоніками дорівнює нулю.



Рисунок 3.1 – Схема утворення гармонічної групи

Середньоквадратичне значення гармонічної підгрупи дорівнюватиме кореню квадратному з суми квадратів середньоквадратичних значень гармонійної складової і двох спектральних складових, що безпосередньо примикають до неї (рис. 3.2)

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (3.2)$$

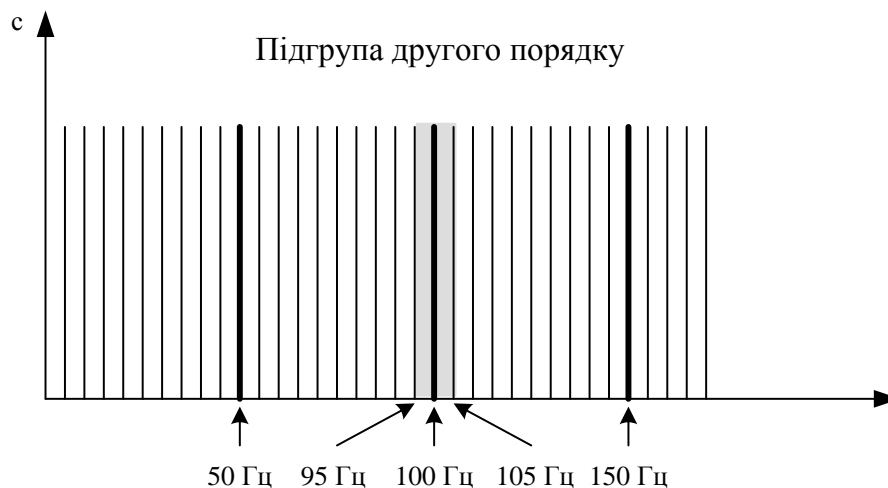


Рисунок 3.2 – Схема утворення підгрупи

Алгоритм визначення гармонічних груп відповідно до [22, 28] є наступним. Як вже відзначалося в [26], гармонійний аналіз необхідно проводити до 50 гармоніки, що при часовому вікні 200 мс, частотному розділенні 5 Гц і необхідності виконання умов теореми Шенона (Котельникова) призводить до частоти дискретизації вхідного сигналу 6,4 кГц і вейвлет-розкладання до $j=7$ рівня.

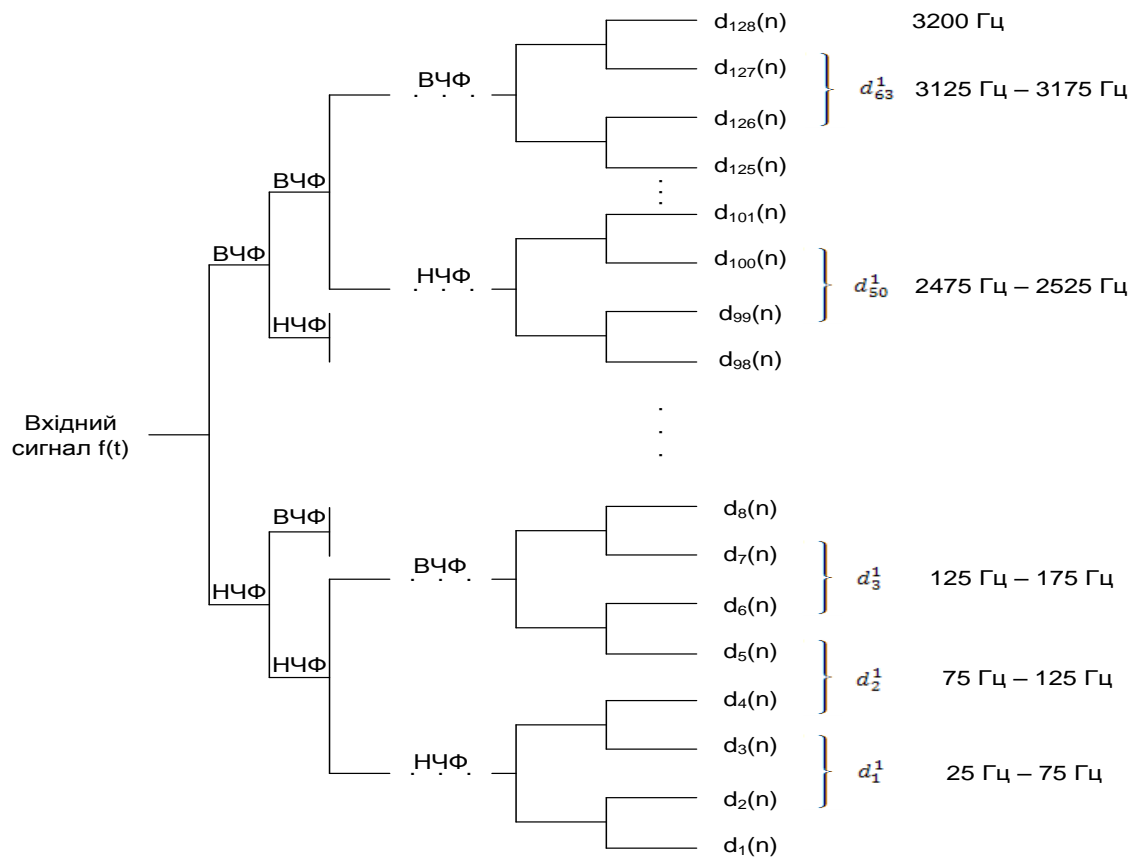


Рисунок 3.3 – Дерево вейвлет-пакетного розкладання з групуванням частотних смуг (діапазонів): $d_1(n), \dots, d_{128}(n)$ – вейвлет-коефіцієнти сьомого рівня розкладання (частотні смуги шириною 3200/128-25 Гц)

Відповідно до (3.1), згрупуємо вейвлет-коефіцієнти сьомого рівня розкладання на 63 групи (d_{63}^1), з кожним компонентом частоти гармоніки (як парних, так і непарних) в центрі кожної групи з інтервалом 50 Гц. Визначимо середньоквадратичне значення кожної групи як корінь квадратний з середнього квадрата коефіцієнтів двох підгруп, що входять до кожної групи, відповідно до [29, 30]. Наприклад:

$$x_{срkv}(1) = \sqrt{\frac{1}{2}(d_1')^2} = \sqrt{\frac{1}{2}(d_2(n) + d_3(n))^2}. \quad (3.3)$$

У загальному випадку середньоквадратичне значення сигналу будь-якого вузла (j, p) визначається через вейвлет-коефіцієнти $d_{j,k}$ таким чином:

$$x_{срkv}(j,p) = \sqrt{\sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j,k}^p)^2}, \quad (3.4)$$

Отже, середньоквадратичне значення усіх гармонічних груп сигналу на будь-якому рівні вейвлет-декомпозиції визначиться таким чином:

$$x_{срkv}(j) = \sqrt{\sum_{p=0}^{2^j-1} (x_{срkv}(j,p))^2}, \quad (3.5)$$

У якості досліджуваного сигналу обрано наступний (рис. 3.4):

$$x(t) = \sqrt{2}(220\sin(\omega t - 19,91^\circ) + 55\sin(3\omega t - 35^\circ) + 30\sin(5\omega t + 110^\circ) + 120\sin(7\omega t + 19^\circ)) \quad [94],$$

що має першу, третю, п'яту і сьому гармоніки. Частота дискретизації – 800 Гц (0,00125 с), рівень вейвлет-розкладання – $j = 4$ (16 відліків на період), часове вікно – 10 періодів.

Даний сигнал обраний за результатами аналізу наявності гармонік у електричній мережі. Так, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги визначається: в мережах з електродуговими сталеплавильними і руднотермічними печами в основному 2, 3, 4, 5, 7 – гармоніками; установок дугового і контактного зварювання – 5, 7, 11, 13 – гармоніками; застосування газорозрядних ламп приводить до появи токів 3 та 5 гармонік (можуть складати 10 % та 3 % від струму основної гармоніки); трансформатори головної понижуючої підстанції дають 5 – ту гармоніку при несинусоїдальній напрузі на їх вводах.

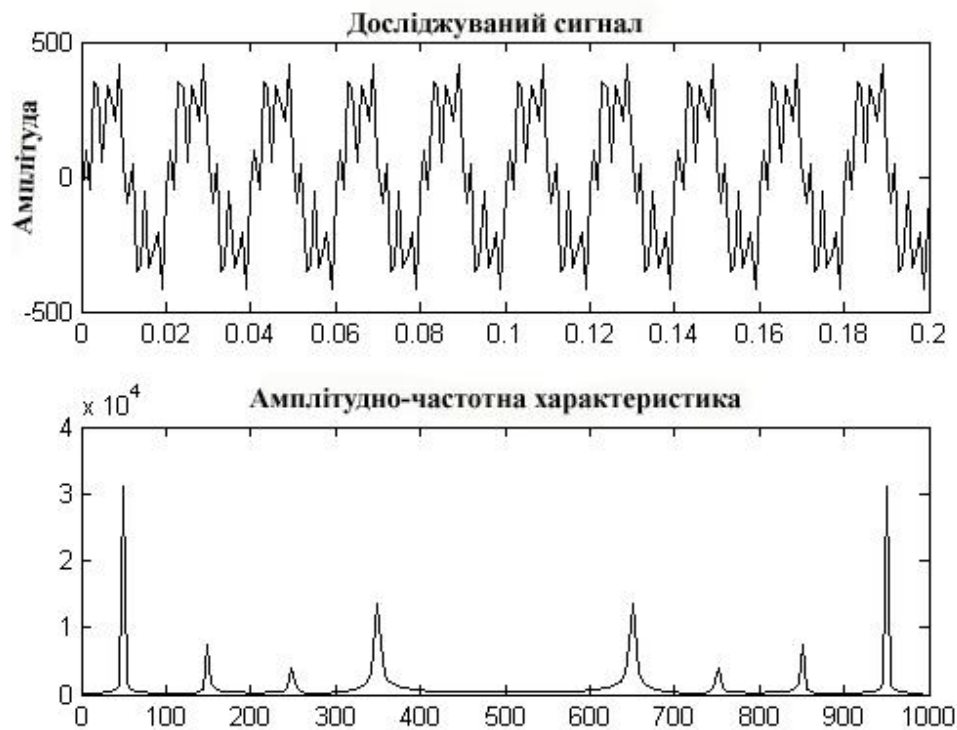


Рисунок 3.4 – Досліджуваний сигнал і його амплітудно-частотна характеристика

Розрахунок гармонічних груп проводився за допомогою ДПФ відповідно до [9] і вейвлет-аналізу з різними типами вейвлетів. Результати обчислень представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз виміру гармонічних груп за ДПФ і вейвлет-перетворенням

Частотна смуга (діапазон), Гц	Гармонічна група	ДПФ	Вейвлет-аналіз			
			Добеші		'haar'	'morl'
			'db2'	'db9'		
25-75	1	220,001	220,0013	220,86	219,05	220,03
125-175	3	55,006	55,004	55,009	54,98	55,01
225-275	5	29,61	30,009	30,067	29,48	30,01
325-375	7	120,006	119,896	120,12	120,16	120,015
Сумарне значення	258,27		258,267	259,10	257,51	258,35
Помилка, %	0,015		0,016	-0,3	0,309	-0,0155

В якості вейвлет-базисів використовувалися вейвлети Добеші, Хара і Морле. Як видно із таблиці 3.1, результати визначення гармонічних груп за алгоритмом ДПФ і вейвлет-аналізом різняться в четвертому знаку після коми, тобто є еквівалентними.

Проаналізуємо стійкість даних результатів у випадку наявності у досліджуваному сигналі (напруга електричної мережі) спотворень. Для цього в електричний сигнал $x(t)$ введемо спотворення – шумову компоненту. На рис. 3.5 представлений аналізуємий сигнал.

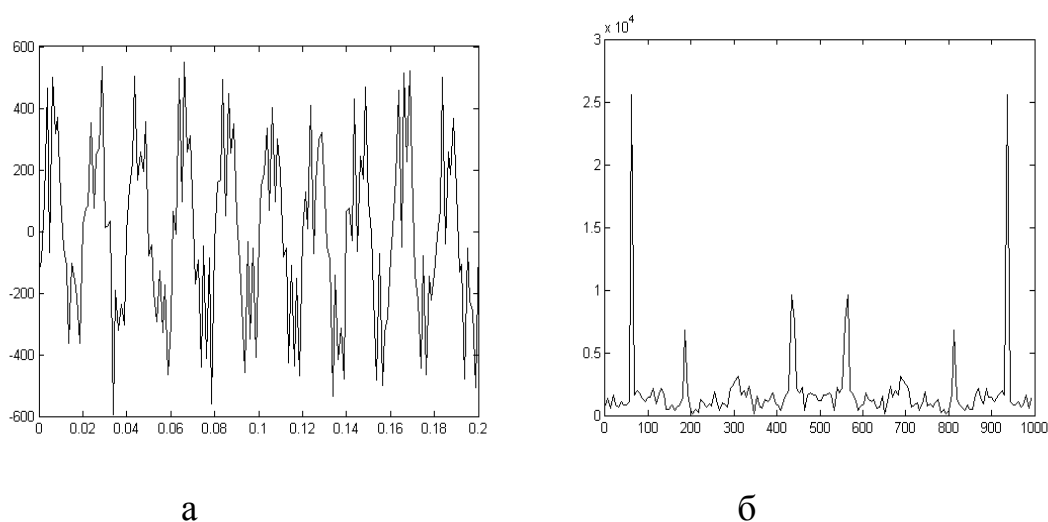


Рисунок 3.5 – Досліджуваний зашумлений сигнал (а) і його амплітудно-частотна характеристика (б)

Характер АЧХ (рис. 3.5, б), визначений за допомогою ДПФ, свідчить, що шум викликає зміни частотного образу сигналу в усьому інтервалі частот, які «розмазуються» по усій частотній осі. Отже їх виявлення за спектром стає практично неможливим. Результати розрахунку гармонічних груп зашумленого сигналу за допомогою ДПФ (без застосування віконних функцій – у зв'язку з тим, що спотворення, в основному, нестационарні, вибір необхідного вікна дуже ускладнюється) і вейвлет-аналізу зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльний аналіз виміру гармонічних груп за ДПФ і вейвлет-перетворенням сигналу із шумом (рис. 3.5, а)

Частотний діапазон, Гц	Гармонічна група	ДПФ	Вейвлет-аналіз			
			Добеші		'haar'	'morl'
			'db2'	'db9'		
25-75	1	220,9	220,13	221,00	221,65	220,09
125-175	3	56,08	55,09	56,40	56,48	55,10
225-275	5	30,61	30,1	30,67	31,45	30,21
325-375	7	121,1	120,06	121,19	121,36	120,055
Сумарне значення	259,89		258,48	259,10	260,84	258,35
Помилка, %	-0.612		-0.0658	-0.306	-0.979	-0,058

Як показує аналіз отриманих результатів, застосування пакетного вейвлет-перетворення для гармонічного аналізу спотвореного сигналу в електричних мережах є на порядок точнішим у порівнянні з ДПФ за виключенням випадку застосування вейвлетів Haar.

Подальші дослідження точності проведення гармонічного аналізу за наявності шуму проводилися таким чином. При використанні вейвлет-аналізу відділялися високочастотні складові (деталізуючі вейвлет-коефіцієнти) із спектру шляхом обмеження їх рівня за допомогою визначеного порогового значення, а при ДПФ – застосовувалися вікна. Ефективнішим, за наявності впливу шуму на результати гармонічного аналізу, виявився вибір жорсткого порогу [29, 30] та обмеження величини деталізуючих коефіцієнтів в порівнянні з віконним перетворенням Фур'є.

Проведене порівняння доцільності застосування перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення для аналізу інформаційних сигналів, які мають гармоніки із змінними в часі амплітудами та фазами. Для цього був змодельований сигнал, який має першу та третю гармоніки, амплітуда котрої змінюється впродовж періоду від 0.04 с до 0.08 с:

$$f(t) = \begin{cases} \sin(2 * \pi * 50 * t) + 0.5 * \sin(2 * \pi * 150 * t), & \{0 < t \leq 0.04s\} \\ \sin(2 * \pi * 50 * t) + 0.5 * t * \sin(2 * \pi * 150 * t), & \{0.04 < t \leq 0.08s\} \\ \sin(2 * \pi * 50 * t) + 0.5 * \sin(2 * \pi * 150 * t), & \{0.08 < t \leq 0.12s\} \end{cases}$$

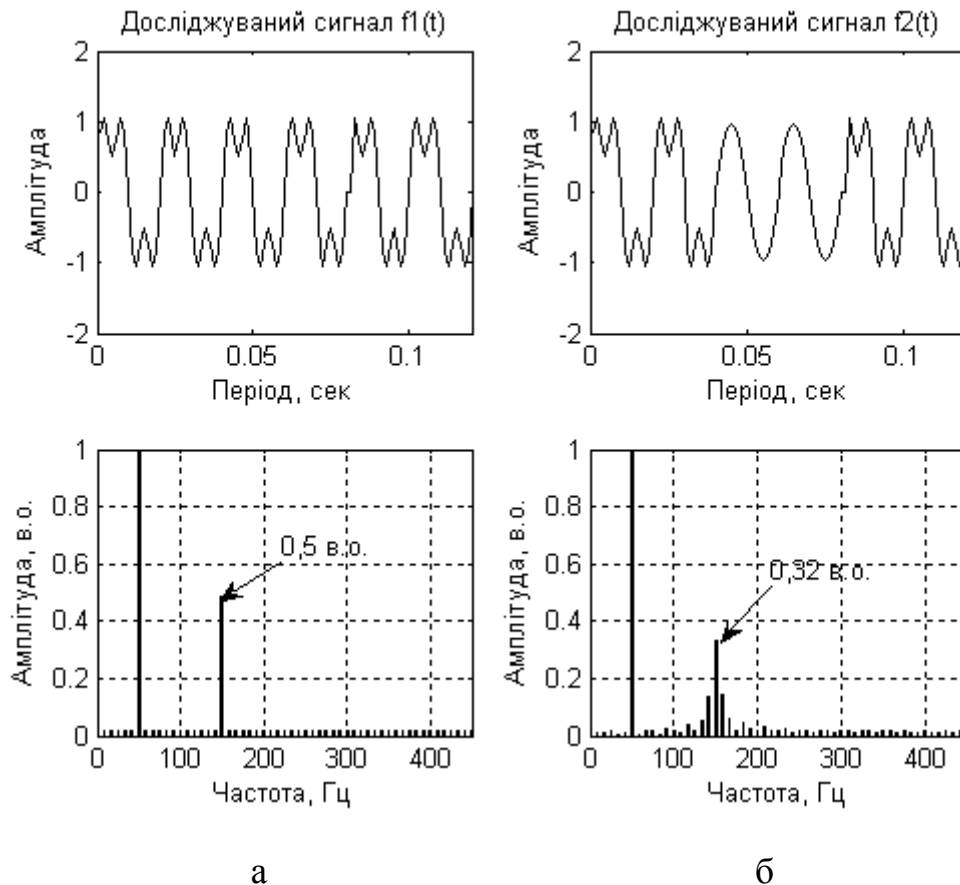


Рисунок 3.6 – Фур’є-аналіз інформаційного сигналу: а – сигнал без коливань амплітуди третьої гармоніки; б – коливання амплітуди третьої гармоніки впродовж 0.04 до 0.08 с

Як видно із рис. 3.6, перетворення Фур’є не дозволяє проводити точну ідентифікацію ознак даного сигналу. Так, відсутня інформація щодо часу виникнення спотворення сигналу (коливання амплітуди третьої гармоніки) та його тривалості, некоректно визначено амплітуду третьої гармоніки (0.32 в.о. від дійсних 0.5 в.о.). Похибка сягає 36 %.

Як було показано вище, вейвлет-аналіз надає можливість усунути недоліки традиційних математичних методів аналізу інформаційних сигналів, зокрема,

застосуванням короткочасних вікон з високою частотою, а також тривалих вікон із низькою частотою.

Проведений також аналіз впливу типу вейвлету на точність проведення гармонічного аналізу. Зважаючи на гармонічний склад сигналу, обрано вейвлети Добеші (*db20*) та Мейєра (*dmey*) (рис. 3.7).

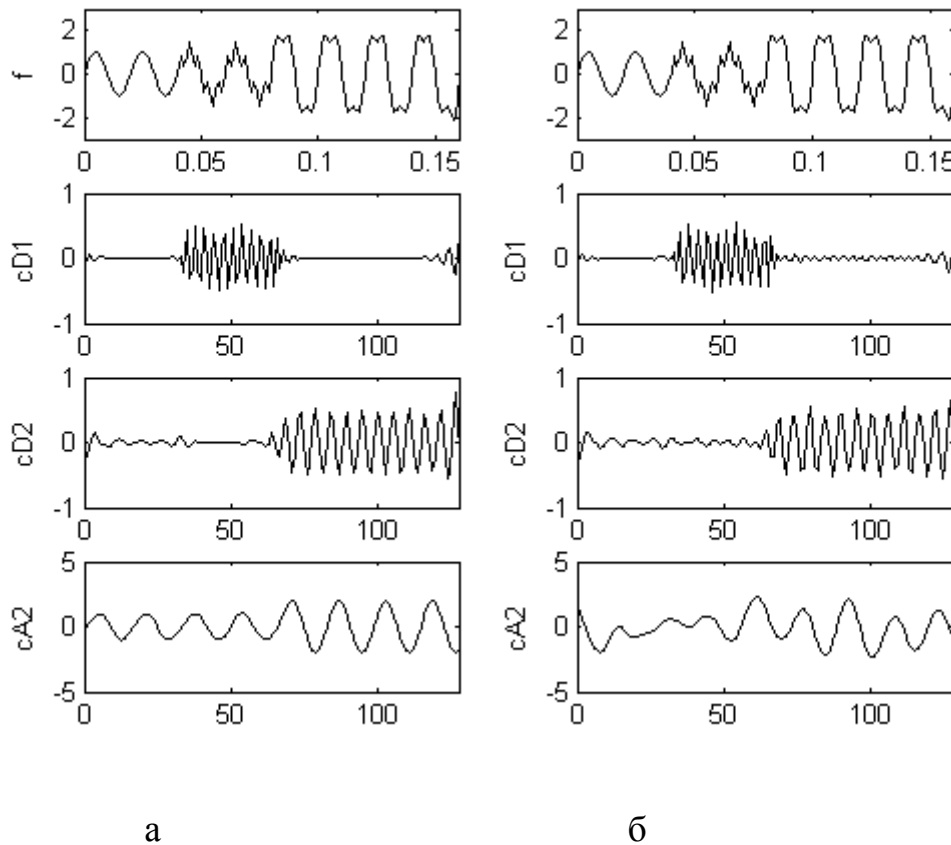


Рисунок 3.7 – Вейвлет-аналіз інформаційного сигналу за допомогою різних типів вейвлетів: а – вейвлет Мейєра ‘*dmey*’; б – вейвлет Добеші ‘*db20*’; *f* – аналізуємий сигнал; *cD1*, *cD2* – деталізуючі коефіцієнти першого та другого рівня вейвлет-декомпозиції, відповідно; *cA2* – апроксимуючий коефіцієнт другого рівня вейвлет-декомпозиції

Результати аналізу (враховуючи частоту дискретизації 800 Гц, і, відповідно до частотних властивостей алгоритму Маала і рівня вейвлет-декомпозиції – таблиця 3.3) в аналізуємому сигналі поряд з першою гармонікою (50 Гц), присутні третя (150 Гц) на інтервалі 0.04 с – 0.16 с (деталізуючий коефіцієнт *cD2*), та п’ята (250 Гц) на

інтервалі 0.04 с – 0.08 с (деталізуючий коефіцієнт $cD1$). Тобто, аналіз результатів проведеного дослідження свідчить про можливість однозначної ідентифікації наявності гармонік у сигналі, знаходження їх на часовій сітці та визначення їх тривалості (початок – кінець); при цьому застосуванням до аналізу даного сигналу вейвлетів Мейєра та Добеші одержуються аналогічні результати.

Таблиця 3.3 – Частотні діапазони вейвлет-перетворення за алгоритмом Малла при частоті дискретизації 800 Гц

Рівень декомпозиції, j	Частотні діапазони	
	Коефіцієнти апроксимації, (cA_j)	Коефіцієнти деталізації (cD_j)
1	0 до 200 Гц	від 200 Гц до 400 Гц
2	0 до 100 Гц	від 100 Гц до 200 Гц
3	0 до 50 Гц	Від 50 Гц до 100 Гц

Із табл. 3.3 видно, що значення деталізуючого коефіцієнту $cD1$ містить у собі інформацію про наявність (або відсутність) у сигналі гармонік із частотою 200 – 400 Гц, коефіцієнт $cD2$ – гармонік із частотою 100 – 200 Гц, а $cD3$ характеризує основну гармоніку.

Як відомо, однією із важливих проблем при визначенні якості електричної енергії являється оцінка зміни форми інформаційного сигналу (напруги або струму), яка включає спектральний та гармонічний аналіз. Сфера оцінки форми сигналу містить гармоніки, інтергармоніки, фазні кути гармонік, гармонійні симетричні компоненти та інше. Найбільш часто використовуються наступні гармонічні та інтергармонічні індекси [31, 32]:

- Harmonic Distortion – HD (гармонійні спотворення);
- Total Harmonic Distortion – THD (повне гармонійне спотворення);
- Total Interharmonic Distortion – $TIHD$ (повне міжгармонійне спотворення);
- Total Demand Distortion – TDD (повне спотворення попиту для струму);

- Distortion Band Factor – *DBF* (чинник групи спотворень).

Перші три індекси спотворень знаходяться як середньоквадратичні значення гармонік та інтергармонік і, відповідно, визначені як відсоток основної частоти або оригінального спотвореного сигналу.

Відповідно до чинного ГОСТу 13109-97, індекс *THD* визначається як коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги і розраховується наступним чином

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1}, \quad (3.6)$$

де N – порядок найвищої гармоніки, U_n^2 – середньоквадратичне значення напруги вищих гармонік, U_1 – середньоквадратичне значення напруги основної частоти.

На даний момент *THD* є найбільш поширеним показником якості напруги і визначається за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Основним недоліком визначення *THD* за (3.6) є можливість його застосування тільки для періодичних сигналів. Іншим істотним недоліком даного коефіцієнту є те, що при його визначенні не враховується індивідуальний вплив на електричну мережу і устаткування різних гармонік, а також відсутність інформації щодо фазових кутів гармонік [33]. Це призводить до похибки визначення *THD* за наявності у сигналі різних гармонічних компонент у перебігу декількох періодів у межах десятків відсотків.

Похибка визначення *THD* для сигналу, гармонічний склад якого змінюється протягом декількох періодів, має у своєму складі інтергармоніку і для якого значення $\cos \varphi$ змінюється від 0.5 до 0.85 зсуву фаз впродовж 3-4 с складає 12,86 % (без урахування інтергармоніки).

Для усунення даних недоліків при визначенні показника порушення форми хвилі напруги і струму в ІЕС 61000–4–7 та у Методиці визначення якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення (СОУ-Н ЕЕ 40.1 – 37471933 – 55:2011, Нормативний документ Міненерговугілля України), розроблених автором (у співавторстві), введено нові коефіцієнти. А саме:

- *THDG* (Total Harmonic Distortion Group) – сумарний коефіцієнт

гармонічних груп як відношення середньоквадратичного значення напруги гармонічних груп до середньоквадратичного значення гармонічної групи, пов'язаної з основною складовою;

- *THDS* (Total Harmonic Distortion Subgroup) – сумарний коефіцієнт

гармонічних підгруп – як відношення середньоквадратичного значення гармонічних підгруп до середньоквадратичного значення гармонічної підгрупи, пов'язаної з основною складовою.

Зважаючи на частотно-просторові властивості вейвлет-аналізу, запропоновано новий підхід до визначення коефіцієнту спотворення форми хвилі сигналу як відношення середньоквадратичних значень енергії всіх деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів до середньоквадратичного значення енергії апроксимуючих коефіцієнтів останнього рівня вейвлет-розкладання.

Наявність окремих гармонічних складових у сигналі визначається на основі аналізу значень енергії відповідних частотних субполос (рівнів вейвлет-розкладання). При цьому, коефіцієнт спотворення форми сигналу розраховується за наступною формулою

$$W_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{J-1} \sum_{k=1}^{N_j} (cD_j(k))^2}}{\sqrt{\sum_k (cA_J(k))^2}}, \quad (3.7)$$

де $cD_j(k)$ і $cA_J(k)$ – деталізуючі і апроксимуючі коефіцієнти відповідно, J – останній рівень вейвлет-декомпозиції.

Результати аналізу можливості використання даного коефіцієнту довели його ефективність. Так, за наявності в аналізованому сигналі гармонік (третя, сьома, одинадцята, сімнадцята), гармонійних груп та гармонійних підгруп похибка визначення W_{THD} знаходиться у межах 0,5 %, а THD – у межах 2,0 %.

Що стосується такого індексу спотворення форми хвилі сигналу як DBF , то потрібно відмітити наступне. Як відомо, вейвлет-перетворення за допомогою фільтрів низької та високої частоти ділить вхідний сигнал на частотні діапазони. В зв'язку з чим пропонується у разі моніторингу якості електричної енергії спочатку визначати коефіцієнт спотворення за даними частотними діапазонами, і в разі перевищення визначеного порогового значення, проводити більш детальне визначення різноманітних індексів спотворення форми сигналу (рисунок 3.8).

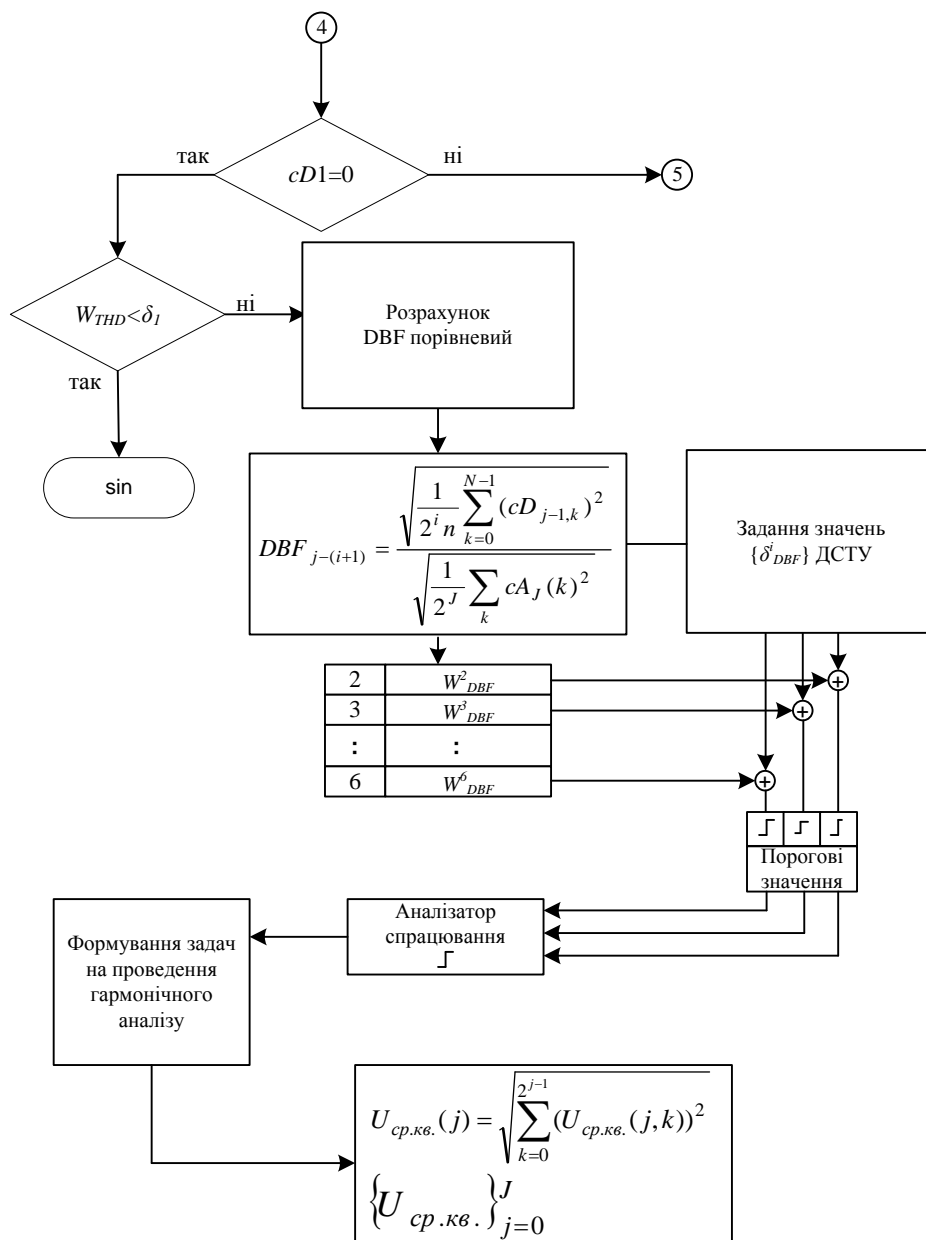


Рисунок 3.8 – Структурно-алгоритмічна модель моніторингу параметрів якості електричної енергії

Тобто, після того як за допомогою вейвлет-декомпозиції вихідний сигнал поділений на частотні діапазони, проводиться безперервний контроль спотворення сигналу у даних частотних діапазонах за формулою [34, 35]:

$$DBF_{f1-f2} = \frac{U_{cp.kv.}(f1-f2)}{U_{cp.kv.}}, \quad (3.8)$$

де $U_{cp.kв(f1-f2)}$ – середньоквадратичне значення компонент сигналу (напруги) частотної полоси $(f1 - f2)$, $U_{cp.kв}$ – середньоквадратичне значення гармоніки основної частоти.

При цьому, середньоквадратичне значення сигналу для кожного частотного діапазону розраховується за допомогою вейвлет-коефіцієнтів відповідного частотного діапазону, а саме

$$U_{cp.kв(f_{j-1}-f_{j-(i+1)})} = \sqrt{\frac{1}{2^i n} \sum_{k=0}^{N-1} (cD_{j-1,k})^2}, \quad (3.9)$$

де $cD_{j-1,k}$ – деталізуючі коефіцієнти відповідного частотного діапазону (рівня вейвлет-декомпозиції), N – число вейвлет-коефіцієнтів, розрахованих для цілого числа періодів вихідного сигналу, n – відносні числа вейвлет-коефіцієнтів в аналізованому частотному діапазоні, i – порядковий номер відповідного частотного діапазону (рівня вейвлет-декомпозиції), $i \in 1..j$. Значення n та 2^j являються константами для кожного частотного діапазону.

Тобто, в режимі моніторингу достатньо контролювати величину спотворення в частотному діапазоні, а у випадку перевищення його порогового значення (визначається для кожного частотного діапазону відповідно нормативних документів) проводити вимірювання окремих гармонік (гармонічних груп). Даний метод являється дуже корисним для визначення вищих гармонік у випадку контролю якості електричної енергії. У разі його застосування відсутній недолік методу Фур'є – необхідність достовірної інформації щодо перехідних процесів, а також недолік дискретного вейвлет-перетворення – відсутність даних відносно кожної окремої гармоніки.

Висновки до розділу

1. Запропонована інформаційна модель визначення та ідентифікації спотворень (до $\sim 20\%$), точність (у ~ 2 рази) та швидкодію (до $\sim 40\%$) процесу ідентифікації якості електричної енергії, яка має ієрархічну структуру обчислення локальних максимумів за рівнями вейвлет-перетворення із зрушенням τ ,

адаптивним до досліджуваного сигналу. На відміну від існуючих, дана модель дозволяє підвищити ефективність спотворень інформаційних сигналів.

2. Запропоновано визначати наявність спотворень у інформаційному сигналі за значенням деталізуючого вейвлет-коефіцієнту першого рівня декомпозиції (має нульові значення у більшості точок за виключенням тих, в яких порушення відбувається), який нечутливий до усталених сигналів, але характеризує значні коливання амплітуди, пов'язані з високочастотними короткочасними спотвореннями форми сигналу. Гострі і короткі піки амплітуди відповідають спотворенням короткої тривалості – падіння (провал) напруги, перевищення або короткі переривання сигналу, в протилежному випадку, якщо вони представлені тривалими серіями піків, – повторюваним високочастотним спотворенням.

3. Запропоновано підхід, який дозволяє зменшити об'єм необхідної пам'яті для зберігання даних у п'ять разів – вейвлет-коефіцієнти проріджуються після кожного кроку декомпозиції і для вимірювання низькочастотних параметрів підлягають збереженню виключно коефіцієнти, які представляють низьку частоту (вейвлет-коефіцієнти, які представляють різноманітні частотні полоси, можуть зберігатися для різноманітних часових інтервалів – вони записуються у пам'ять).

4. Запропонований метод ідентифікації та класифікації спотворень якості електричної енергії за допомогою розробленого вектору ознак класифікації спотворень, який представляється різницею енергій за рівнями вейвлет-декомпозиції спотвореного та синусоїдального сигналів. Виключно синусоїдальна форма сигналу ідентифікується за наявністю найбільшої енергії вейвлет-коефіцієнтів сьомого рівня декомпозиції; перевищення, зниження та провали напруги – сьомого рівня та тривалістю, більшою за напівперіод основної частоти; короткочасні спотворення – за найбільшою енергією вейвлет-коефіцієнтів на восьмому рівні та тривалістю спотворення на першому рівні меншою, ніж напівперіод основної частоти. Гармонічні спотворення однозначно ідентифікуються за наявністю енергії спотворення на перших рівнях вейвлет-декомпозиції.

5. Обґрунтовано вибір типу материнського вейвлету в залежності від типу спотворення (частотного діапазону, в якому проявляється дане спотворення). На

верхніх рівнях декомпозиції вейвлет більш локалізований в часі і його коливання проходять з великою швидкістю і малим періодом, тобто ці рівні більш придатні для визначення короточасних і швидкоплинних спотворень; на нижніх рівнях декомпозиції слід обирати вейвлети з більшим періодом коливань. Оптимальними є наступні типи вейвлетів – *Db2*, *Sym2*, *Coif1* відповідно до частотних діапазонів.

6. Доведено можливість однозначної ідентифікації та класифікації

наявності декількох типів спотворень на різних часових інтервалах за допомогою попереднього сегментування інформаційного сигналу. При цьому, визначені коефіцієнти cD_1 можуть використовуватись для моніторингу числа змін в сигналі протягом обраного часового вікна – що важливо для визначення джерела спотворення та часу його виникнення.

7. Показано, що за наявності шумів у сигналі проведення гармонічного аналізу за допомогою вейвлет-перетворення дозволяє підвищити точність у два рази порівняно із перетворенням Фур'є.

8. Запропоновано новий підхід до визначення коефіцієнту спотворення форми хвилі сигналу як відношення середньоквадратичних значень енергії всіх деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів до середньоквадратичного значення енергії апроксимуючих коефіцієнтів останнього рівня вейвлет-розкладання – W_{THD} , та доведено його ефективність у порівнянні із коефіцієнтом THD . За наявності в аналізуємому сигналі гармонік (третя, сьома, одинадцята, сімнадцята), гармонійних груп та гармонійних підгруп похибка визначення W_{THD} знаходиться у межах 0,5 %, а THD – у межах 2,0 %.

9. Показано, що розроблена інформаційна модель визначення та ідентифікацій типу спотворень якості електричної енергії дозволяє спочатку визначати коефіцієнт спотворення за даними частотними діапазонами, і в разі перевищення визначеного порогового значення (встановлюється для кожного частотного діапазону відповідно до нормативних документів), проводити більш детальний аналіз різноманітних індексів спотворення форми сигналу, що на два порядки величини збільшує швидкість проведення моніторингу ЯЕЕ.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Ідея проекту полягає у впровадженні пристрою моніторингу якості електроенергії в реальному часі, з подальшої реєстрації даних, зберігання і передачі їх по RS485, Ethernet, та з можливості автоматичного та віддаленого керування мережею.

Використання даного пристрою передбачає моніторинг показників якості електроенергії, можливості визначення часу та типу погіршення якості електроенергії, автоматична та ручне керування мережею, і зручності використання.

Опис ідеї стартап-проекту, що розкриє цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів, вказаний у таблиці 4.1 [36].

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Пропонується ідея проекту яка полягає у впровадженні пристрою контролю якості електроенергії в реальному часі, з подальшої реєстрацією даних, зберігання і передачі їх по RS485, Ethernet, та з можливості автоматичного та віддаленого керувати мережею.	1. Засіб для оцінення якості електричної енергії	Можливість оцінення споживаної якості електроенергії
	2. Засіб для збору інформації	Можливість налаштування автоматичного управління мережею
	3. Засоби для управління та синхронізації даних з мобільним додатком	Можливість за допомогою програми на смартфоні переглядати параметри якості енергії прив'язані до часу, налаштування параметрів сповіщення при погіршенні показників якості електроенергії, налаштування автоматичного управління мережею та віддалене управління мережею

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного методу є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

Поки немає конкурента в Україні оскільки даний тип пристрою поширений тільки для статичного опитування і контролю якості електричної енергії обслуговуючим персоналом.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (порядок дій для реалізації комплексного підходу).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, що зображені у таблиці 4.2 [37].

Таблиця 4.2 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Визначення за допомогою програмного забезпечення спотворень електроенергії за певний період часу	Oracle MySQL	наявна	доступна
2.	Встановлення фільтра та трансформатора для перетворення сигналу мережі	Вимірювальний трансформатор	наявна	доступна
3.	Використання відкритої платформи для розробки Arduino IDE	Arduino Uno	наявна	доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Oracle MySQL				

База даних MySQL - це найпопулярніша в світі база даних з відкритим кодом. Завдяки своїй перевіреної продуктивності, надійності і простоті використання база даних MySQL найбільш часто використовується для веб-додатків. Крім того, її особливо часто вибирають в якості вбудованої бази даних, яка розповсюджується тисячами постачальників програмного забезпечення і виробників обладнання.

Вимірювальний трансформатор — трансформатор, призначений для пересилання інформаційного сигналу вимірювальним приладам, лічильникам, пристроям захисту і (або) керування

Arduino - це невелика плата з власним процесором і пам'яттю. На платі також є пара десятків контактів, до яких можна підключати всілякі компоненти: лампочки, датчики, мотори, роутери, периферію для передачі даних, магнітні дверні замки і взагалі все, що працює від електрики. У процесор Arduino можна завантажити програму, яка буде керувати всіма цими пристроями за заданим алгоритмом. Існує велика лінійка різновиду платформ сімейства Arduino, а саме: Arduino Mini, Arduino Nano, Arduino Uno, Arduino Mega, Arduino Leonardo тощо.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкового середовища: складання таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають, ці фактори перераховані у таблицях 4.3 і 4.4 відповідно [37].

Таблиця 4.3 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Складне економічне становище в країні	Брак коштів щодо реалізації самого проекту	Зниження ціни
2.	Конкуренція	Створення аналогічного обладнання	Зниження ціни

Таблиця 4.4 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Підвищення контролю якості електроенергії і захисту приладів підключених до мережі	Створення і оновлення функцій, розширення можливостей	Реклама продукту

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу - матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), SWOT-аналіз продемонстрований у таблиці 4.5.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза). Підсумовуючи сильні та слабкі сторони даного проекту слід обрати альтернативу ринкового впровадження.

Таблиця 4.5 - SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - якісний товар; - наразі проект не має конкурентів аналогів; - зручність установки та експлуатації; - автоматичне управління та моніторинг стану електроспоживання за допомогою смартфона; 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - економічна ситуація в державі; - невисокі затрати на рекламу; - необізнаність покупців; - загрози нестабільної роботи із-за новизни
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - підвищення надійності якості електроенергії та захист пристроїв; - зменшення вартості пристрою; - розширення асортименту продукції; - розширення асортименту додаткових послуг; 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - складне економічне становище в країні; - з'явлення конкуренція. - зменшення попиту;

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Так, як треба зосередитися на одному сегменті, то стратегія проекту буде концентрованою. У ролі стратегії розвитку, обрано стратегію диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару, бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів. Вибір цільових груп потенційних споживачів проведений у таблиці 4.6 [38].

Таблиця 4.6 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність сприйняття споживачем товару	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Приватний покупець	Часткова готовність	Достатній	Слабка	Складно
2.	Інвестори	Повна готовність	Достатній	Слабка	Складно
3.	Державні органи влади	Часткова готовність	Достатній	Помірна	Складно
	Які цільові групи обрано: Приватний покупець				

Оскільки компанія зосереджується на одному сегменті – вона обирає стратегію концентрованого маркетингу. В цьому випадку компанія реалізує заходи по формуванню попиту(навчанню споживачів користуванню товаром, формування регулярного попиту, збільшення споживання). Така стратегія можлива тільки на початкових стадіях життєвого циклу товару, коли попит ще є розширюваним, а взаємний тиск конкурентів ще невеликий. Інакше фірмі лідерів необхідно приймати оборонну або наступальну стратегію.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Маркетингова модель товару може бути представлена наступним чином.

Товар за задумом: пристрій, який встановлюється на DIN рейку і обробляє стан якості електроенергії синхронізує данні якості електроенергії з сервером, смартфоном.

Товар у реальному виконанні передбачає наступні характеристики:

- номінальна напруга живлення 5 В;

- номінальний струм споживання до 150мА;
- інтерфейс передачі даних: RS485, Ethernet(RJ45);
- дисплей для виводу графічної інформації, 3 кнопки управління;
- відповідні сертифікати та стандарти.

Товар із підкріпленням передбачає послуги по встановленню, монтажу, сервісні послуги та послуги обслуговування.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару показано у таблиці 4.7 [39].

Таблиця 4.7 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі, або такі, що потрібно створити)
1.	Надійність та захищеність	Індивідуальний доступ для кожного клієнта	Індивідуальний частковий доступ
2.	Повнота даних	Аналіз даних по кожному споживачу	Повнота даних по якості електроенергії
3.	Достовірність інформації	Інформація отримана від інформаційних блоків засобів	Інформація є достовірною
4.	Підтримка та оновлення	Створення і оновлення функцій, розширення можливостей	Врахування індивідуальних побажань клієнтів для кожного пристрою

Концепція, згідно з якою компанія ретельно обмірковує і координує роботу своїх численних каналів комунікації називається концепція маркетингової комунікації, вона продемонстрована у таблиці 4.8. Це робиться з метою вироблення чіткого, послідовного і переконливого уявлення у споживачів про продукт.

Спрямована на інформування, переконання, нагадування споживачам та ринку в цілому про продукт і діяльність [38].

Таблиця 4.8 - Концепція маркетингової комунікації

№ п/п	Цільові групи	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Приватний покупець	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність
2.	Інвестори	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність
3.	Державні органи влади	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність

Висновки до розділу

1. Розроблено стартап-проект, ідея якого полягає у впровадженні та економічному обґрунтуванні підвищення якості електроенергії розподільних мереж, а саме комплексному підході, який буде направлений для використання електропередавальними компаніями або особами, які використовують ці технології для енергозабезпечення своїх потреб.

2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту показав, що даний продукт вразливий до таких загроз як слабка купівельна спроможність громадян та посилена конкуренція, проте цим загрозам можна протистояти якщо знизити ціну на продукт.

3. Дослідження дозволило визначити, що найбільший попит серед всіх цільових груп матимуть приватний покупець.

4. Аналіз підтвердив, що є доцільна подальша імплементація проекту за рахунок її дешевизни, різноманітним інтерфейсом зв'язку, зручністю використання, контролю показників електроспоживання і налаштування пристрою.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було розглянуто вплив розподіленого генерування на якість електричної енергії, а в основному на гармонічний склад та дозу флікера.

До джерел розосередженої генерації відносять установки малої потужності (до 10 МВт), що розташовані безпосередньо поблизу споживача, та можуть буди під'єднані до енергосистеми. До джерел розосередженої генерації відносяться: фотоелектричні елементи, вітрові установки, малі ГЕС, дизельгенератори.

У зв'язку з цим у роботі розглядається вплив на якість електричної енергії (доза флікера) гармонік, інтергармонік та субгармонік, які генерують у електричну мережу розосереджені джерела енергії.

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що дані субгармонійні коливання з даними амплітудами не виходять за межі норми, тобто доза флікера менше одиниці. Але сумісне використання джерел з даними субгармонійними коливаннями допускається лише в деяких випадках (коли P_{st} менше 1).

Запропонована інформаційна модель визначення та ідентифікації спотворень (до $\sim 20\%$), точність ($y \sim 2$ рази) та швидкодію (до $\sim 40\%$) процесу ідентифікації якості електричної енергії, яка має ієрархічну структуру обчислення локальних максимумів за рівнями вейвлет-перетворення із зрушенням τ , адаптивним до досліджуваного сигналу. На відміну від існуючих, дана модель дозволяє підвищити ефективність спотворень інформаційних сигналів.

Запропоновано визначати наявність спотворень у інформаційному сигналі за значенням деталізуючого вейвлет-коефіцієнту першого рівня декомпозиції (має нульові значення у більшості точок за виключенням тих, в яких порушення відбувається), який нечутливий до усталених сигналів, але характеризує значні коливання амплітуди, пов'язані з високочастотними короткочасними спотвореннями форми сигналу. Гострі і короткі піки амплітуди відповідають спотворенням короткої тривалості – падіння (провал) напруги, перевищення або короткі переривання

сигналу, в протилежному випадку, якщо вони представлені тривалими серіями піків, – повторюваним високочастотним спотворенням.

Показано, що за наявності шумів у сигналі проведення гармонічного аналізу за допомогою вейвлет-перетворення дозволяє підвищити точність у два рази порівняно із перетворенням Фур'є.

Запропоновано новий підхід до визначення коефіцієнту спотворення форми хвилі сигналу як відношення середньоквадратичних значень енергії всіх деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів до середньоквадратичного значення енергії апроксимуючих коефіцієнтів останнього рівня вейвлет-розкладання – W_{THD} , та доведено його ефективність у порівнянні із коефіцієнтом THD . За наявності в аналізуємому сигналі гармонік (третя, сьома, одинадцята, сімнадцята), гармонійних груп та гармонійних підгруп похибка визначення W_{THD} знаходиться у межах 0,5 %, а THD – у межах 2,0 %.

Розроблено стартап-проект, ідея якого полягає у впровадженні та економічному обґрунтуванні підвищення якості електроенергії розподільних мереж, а саме комплексному підході, який буде направлений для використання електропередавальними компаніями або особами, які використовують ці технології для енергозабезпечення своїх потреб.

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту показав, що даний продукт вразливий до таких загроз як слабка купівельна спроможність громадян та посилена конкуренція, проте цим загрозам можна протистояти якщо знизити ціну на продукт.

Дослідження дозволило визначити, що найбільший попит серед всіх цільових груп матимуть приватний покупець.

Аналіз підтвердив, що є доцільна подальша імплементація проекту за рахунок її дешевизни, різноманітним інтерфейсом зв'язку, зручністю використання, контролю показників електроспоживання і налаштування пристрою.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gonen, T. Electric power distribution system engineering / T. Gonen // Second Edition, CRC Press. – 2007. – 856 p.
2. Pepermans, G. Distributed generation: definition, benefits and issues / G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer // Energy Policy. – 2005. – No. 33. – P.787-798. – doi: 10.1016/j.enpol.2003.10.004.
3. Hrisheekesha, P. Evolutionary algorithm based optimal control in distribution system with dispersed generation / P. Hrisheekesha, J. Sharma // International Journal of Computer Applications. – 2010. – No. 14. – P. 31-37. – doi:10.5120/305-471.
4. Jung, J. Coordinated control of automated devices and photovoltaic generators for voltage rise mitigation in power distribution circuits / J. Jung, A Onen, R. Arghandeh, R. Broadwater // Renewable Energy. – 2014. – № 66. – P. 532-540. – doi:10.1016/j.renene.2013.12.039.
5. Tran, K. Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems / K. Tran, M. Vaziri // Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting – 2005 – vol.3. – P. 2173-2178. – doi:10.17485/ijst/2011/v4i10/30172
6. ДСТУ 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення»
7. Sarabia A.F. Impact of distributed generation on distribution system // Department of Energy Technology, Aalborg, Denmark.
8. Saadati M., Mortazavi S.S. Two modified method for Harmonic and Flicker measurement based on RWPC considering spectral leakage and edge effects.
9. Xaili Ma, Girgis F.F. Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11. – No. 3. – P. 1659 – 1665.
10. Dasha P.K., Shazia Hasana, Panigrahib B.K. A hybrid unscented filtering and particle swarm optimization technique for harmonic analysis of nonstationary signals // India Institute of Technology, India, 2009.

11. Huang Sh.-J., Hsich C.-T. Visualizing time-varying power system harmonics using a Morlet wavelet transform approach // Electric Power-Systems Research. – 2001. – Vol. 58. – No. 2. – P. 81 – 88.
12. Riberio P. Wavelet transform: An Advances Tool for Analyzing non stationary harmonic distortion in Power Systems//Proceeding IEEE International Conference on Harmonic in Power Systems. - 1994. – P. 365 – 369.
13. Zhen R., Qungu H., Lin G., Wenying H. A new method for power systems frequency tracking based on trapezoid wavelet transform // International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. – 2000. – Vol. 2. – P. 364 – 369.
14. Driesen J., Gherasim G., Belmans R. Comparison of Dynamic Harmonic Measurement Methods // Seveth Int. Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, Cagliari, 2006. – P. 110 – 116.
15. Pham V.J., Wong K.P., Watson N., Arvilaga J. Sub-harmonic state estimation in power systems // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – 2000. – Vol. 2. – P. 1168 – 1173.
16. Волошко А.В. Выполнение гармонического анализа с помощью вейвлет-преобразования//Электронное моделирование. – 2012. – « 4. – С. 65 – 77.
17. Wang J., Qiwen R., Wang F., Yanchao J. Time-varying transient harmonic measurement based on wavelet transform // Proceedings International Conference on Power System Technology. – 1998. – Vol. 2. – P. 1556 – 1559.
18. Driesen J., Graenenbroeck V., Reekmans R., Dommelen V. Analysing timer-varying power system harmonics using wavelet transform // Conference Proceedings IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – 1999. – Vol. 1. – P. 474 – 479.
19. Волошко А.В. Устранение влияния нестабильности частоты сети на точность определения качества электрической энергии/А.В. Волошко, О.В. Коцарь//Техническая электродинамика. – 1994. – « 4. – С. 73 – 77.
20. Zheng T., Makram E.B. Wavelet representation of voltage flicker // Electric Power Systems Research. – 1998. – Vol. 48. – No. 2. – P. 133 – 140.

21. Andria G., Savino H., Trotta A. Windows and interpolation algorithms to improve electrical measurement accuracy // Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1989. – Vol. 38. – No. 4. – P. 856 – 863.
22. Girgis A., Chang B., Makram E. A digital recursive measurement for on line tracking of power systems harmonics // IEEE Trans. On Power Delivery. – 1991. – Vol. 6. – No. 3. – P. 1153 – 1160.
23. Dash P., Pradham A., Panda G. Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalman filters // IEEE Trans. On Power Delivery. – 1999. – Vol. 14. – No. 3. – P. 761 – 766.
24. Zheg T., Makram E.M., Girgis A.A. Power system transient and harmonic studies using wavelet transform // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14. – No. 4. – P. 1461 – 1468.
25. Волошко А.В. Интерполяция и повышение точности проведения гармонического и спектрального анализа//Техническая электродинамика. – 1991. - № 3. – С. 8 – 13.
26. D.Hart, D. Uy, D.Novosel, S.Kunsman, C.Laplace, M.Tellarini Improving power quality // ABB Review. – 2000. – Vol. 4. – №1. – P. 12 – 19.
27. Huang S.J., Hsieh C.T. Application of continues wavelet transform for study of voltage flicker-generated signals // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2000. – Vol. 36. – No. 3. – P. 925 – 932.
28. Chin M.T., Meliopoulos S. Wavelet-based algorithm for voltage flicker analysis // Proceeding Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. – 2000. – Vol. 2. – P. 732 – 738.
29. Michalik M., Okraszewski T.M. Application of the Wavelet Transform to Backup Protection of MV Networks – Wavelet Phase Comparison Method // IEEE Power Tech Conference, 2003.
30. Vatansever F., Ozdewir A. A new approach for measuring RMS value and phase angle of fundamental harmonic based on Wavelet Packet Transform // Electric Power Systems Research. – 2008. – Vol. 78. – P. 74 – 79.

31. Hamid E.Y., Kawasaki Z. Wavelet packet transform for rms values and power Measurements // IEEE Power Eng. Rev. – 2001. – Vol. 21. – No. 9. – P. 49 – 51.
32. Kung S.Y. State-space and singular-value decomposition – based approximation methods for the harmonic retrieval problem//JOSA. – 1983. – Vol. 73. - Issue: 12. – P. 1799 – 1811.
33. Кухаренко Б.Г. Исследование по методу Прони динамики систем на основе временных рядов//Труды МФТИ. – 2009. – том 1. – « 2. – С. 176 – 192.
34. Stoica P. List of references on spectral line analysis//Signal processing. 1993. – Vol 31. – P. 329 -340.
35. Волошко А.В. Интерполяция и повышение точности проведения гармонического и спектрального анализа//Техническая электродинамика. – 1991. - № 3. – С. 8 – 13.
36. Бланк, С. Стартап. Настільна книга засновника / С. Бланк, пер. З англ. Т. Гутман, І. Окунькова, Е. Бакушева. - 2-е вид. - Москва Паблішер, 2014. - 614 с..
37. Дрейпер, У. Стартапи: професійні гри Кремнієвої долини / У. Дрейпер; предисл. Е. Шмідта; пер. з англ. В. Єгорова. - Москва : Ексмо, 2012. - 378 с..
38. Коен, Д. Стартап в Мережі: майстер-класи успішних підприємців Д. Коен, Б Фелд; пер. з англ. М. Іутіна. - 2-е вид. - Москва: Альпіна Паблішер, 2013. - 337 с.
39. Маллинс, Дж. Пошук бізнес-моделі: як врятувати стартап, вчасно змінивши план / Дж. Маллинс, Р. Комісар; - Москва: Манн, Іванов , 2 012. - 329 с.